

DIN EN ISO 16645



ICS 13.280

Einsprüche bis 2019-10-16

Entwurf

**Strahlenschutz –
Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen –
Anforderungen und Empfehlungen an die Ausführung der Abschirmung
und deren Bewertung (ISO 16645:2016);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 16645:2019**

Radiological protection –
Medical electron accelerators –
Requirements and recommendations for shielding design and evaluation (ISO 16645:2016);
German and English version prEN ISO 16645:2019

Radioprotection –
Accélérateurs médicaux d'électrons –
Exigences et recommandations pour la conception et l'évaluation du blindage
(ISO 16645:2016);
Version allemande et anglaise prEN ISO 16645:2019

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-08-16 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nar@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR), Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 176 Seiten

DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR)

Nationales Vorwort

Für das vorliegende Dokument ist das nationale Gremium NA 080-00-02 AA „Strahlenschutz“ des DIN-Normenausschusses Radiologie (NAR) in Arbeitsgemeinschaft mit der Deutschen Röntgengesellschaft und in Zusammenarbeit mit der Deutschen Gesellschaft für Nuklearmedizin e. V. (DGN), der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik e. V. (DGMP) und der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie e. V. (DEGRO) zuständig.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Strahlenschutz — Medizinische Elektronenbeschleuniger-Anlagen — Anforderungen und Empfehlungen an die Ausführung der Abschirmung und deren Bewertung (ISO 16645:2016)

Radioprotection — Accélérateurs médicaux d'électrons — Exigences et recommandations pour la conception et l'évaluation du blindage (ISO 16645:2016)

Radiological protection — Medical electron accelerators — Requirements and recommendations for shielding design and evaluation (ISO 16645:2016)

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp:
Dokument-Stage:
Dokument-Sprache: D

STD Version 2.9p

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
3.1 Größen	8
3.2 Definitionen	11
4 Ziele der Gestaltung von Abschirmungen und andere Gestaltungskriterien	14
4.1 Ziele der Gestaltung der Abschirmung	14
4.2 Annahmen zur Gestaltung der Abschirmung	15
5 Rollen der Hersteller, des Strahlenschutzverantwortlichen oder qualifizierten Experten und Interaktionen zwischen Stakeholdern	16
5.1 Allgemeines	16
5.2 Hersteller des linearen Beschleunigers	16
5.3 Lieferant des Abschirmungsmaterials	17
5.4 Architektenbüro/Bauunternehmer	18
5.5 Strahlenschutzverantwortlicher oder qualifizierter Experte	18
5.6 Der Lizenznehmer	19
6 Strahlungsfelder um einen linearen Elektronenbeschleuniger	19
6.1 Allgemeines	19
6.2 Röntgenstrahlung	20
6.2.1 Primäres Röntgenstrahlenbündel	20
6.2.2 Primäre Elektronenstrahlbremsstrahlung	20
6.2.3 Sekundäre Röntgenstrahlung	21
6.2.4 Tertiäre Röntgenstrahlung	21
6.3 Neutronenstrahlung	22
6.3.1 Allgemeines	22
6.3.2 Direkte Neutronenstrahlung	23
6.3.3 Streu- und thermische Neutronenstrahlung	24
6.3.4 Neutronenstrahlung an der Hauptschutzwand	24
6.4 γ -Strahlung	24
6.4.1 Allgemeines	24
6.4.2 Labyrinth- γ -Strahlung	24
6.4.3 Tür- γ -Strahlung	25
6.4.4 Hauptschutzwand- γ -Strahlung	25
6.4.5 Luft- γ -Strahlung	25
7 Abschirmungsmaterialien und Transmissionswerte	25
8 Allgemeiner Formalismus für die Abschirmungsberechnung	27
9 Abschirmungsberechnungen für konventionelle Geräte	30
9.1 Allgemeines	30
9.2 Hauptschutzwände	30
9.2.1 Strahlungskomponenten	30
9.2.2 Schutzwand mit einem einzigen Material	31
9.2.3 Schutzwand mit mehreren Schichten	31
9.3 Sekundäre Schutzwände	33

9.3.1	Strahlungskomponenten	33
9.3.2	Schutzwand mit einem einzigen Material	33
9.3.3	Schutzwand mit mehreren Schichten	35
10	Türen und Labyrinthen	35
10.1	Allgemeines	35
10.2	Strahlungskomponenten	36
10.3	Standardlabyrinth	36
10.3.1	Berechnungen der Röntgenstreustrahlung in Labyrinthen	36
10.3.2	Direkte Röntgenstreustrahlung	41
10.3.3	Berechnungen der Neutronen und Einfang-Gammas im Labyrinth	42
10.4	Labyrinth mit zwei Strecken	44
10.5	Kein Labyrinth - Direkt abgeschirmte Türen	46
10.5.1	Allgemeines	46
10.5.2	Abschirmung auf der abgewandten Seite eines direkt abgeschirmten Türeingangs	46
10.5.3	Abschirmung auf der zugewandten Seite eines direkt abgeschirmten Türeingangs	49
10.6	Keine Tür am Eingang zum Labyrinth	51
10.7	Türberechnungen	52
10.7.1	Allgemeines	52
10.7.2	Berechnungen für Labyrinthtüren	52
10.7.3	Berechnungen für direkt abgeschirmte Türen	53
11	Abschirmungsberechnungen für spezielle Geräte	53
11.1	Allgemeines	53
11.2	Robotergetriebener Beschleuniger	53
11.3	Helikale fluenzmodulierte Strahlentherapie	54
11.4	Spezielles Gerät für die intraoperative Strahlentherapie mit Elektronen	55
12	Kanäle	56
12.1	Auswirkung von Kanälen auf den Strahlenschutz	56
12.2	Empfohlene Position und Geometrie	56
12.3	Zusätzliche Abschirmung	56
12.3.1	Allgemeines	56
12.3.2	Neutronen- und Einfanggammastrahlung durch das Innere des abgeschirmten Kanals	57
12.3.3	Röntgenstreustrahlung durch das Innere des abgeschirmten Kanals	58
12.3.4	Streustrahlung durch die Wände der Kanalabschirmung	58
12.3.5	Äquivalentdosis an der äußeren Öffnung des HVAC-Kanals	58
13	Besondere Überlegungen	59
13.1	Luftstreustrahlung	59
13.1.1	Allgemeines	59
13.1.2	Röntgen-Luftstreustrahlung	59
13.1.3	Neutronen-Luftstreustrahlung	60
13.2	Groundshine-Strahlungen	61
13.3	Fugen und Verbindungen	62
14	Bewertung der Abschirmung (experimentelle Verifizierung)	62
14.1	Allgemeines	62
14.2	Messgerät und Methodologie	62
14.3	Bewertung	64
15	Anzeigen, Warnhinweise, Verriegelungen	65
Anhang A (informativ)	Zehntelwertebenen für die häufigsten Abschirmungsmaterialien	66
Anhang B (informativ)	Unterstützende Daten für Abschirmungsberechnungen	80
Anhang C (informativ)	Berechnungsbeispiel für konventionelle Geräte und Standardlabyrinth	82
Literaturhinweise		90

Europäisches Vorwort

Der Text von ISO 16645:2016 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 85 „Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und als EN ISO 16645:2016 durch das Technische Komitee CEN/TC 430 „Kernenergie, Kerntechnik und Strahlenschutz“ übernommen, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Dezember 2019, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Dezember 2019 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können, ohne dass diese vorstehend identifiziert wurden. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 16645:2016 wurde vom CEN als EN ISO 16645:2019 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde gemäß den redaktionellen Regeln der ISO/IEC-Richtlinien, Teil 2, entworfen. www.iso.org/directives

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Einzelheiten zu Patentrechten, die während der Erstellung des Dokuments kenntlich gemacht wurden, befinden sich in der Einleitung und/oder auf der erhaltenen ISO-Liste der Patentanmeldungen. www.iso.org/patents

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erklärung der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke mit Bezug zur Konformitätsbewertung sowie für Informationen zur Einhaltung der Prinzipien der WTO im Übereinkommen über technische Handelshemmnisse (Technical Barriers to Trade – TBT) seitens der ISO siehe folgende URL: Vorwort – Zusätzliche Informationen

Das für dieses Dokument verantwortliche Komitee ist ISO/TC 85, *Nuclear energy, nuclear technologies, and radiological protection*, Subkomitee SC 2, *Radiological protection*.

Diese korrigierte Fassung von ISO 16645:2016 beinhaltet die Korrekturen der Tabellen A.9 und C.6.

Einleitung

Strahlentherapie nutzt äußere Strahlung, um Krebszellen zu zerstören und Tumore zu schrumpfen. Die Verwendung linearer Elektronenbeschleuniger zur Steuerung der externen Strahlung hat sich in den vergangenen Jahrzehnten verbreitet und ist heute weltweit üblich. Diese Beschleuniger liefern hochenergetische Elektronen- und Photonenstrahlen mit steigenden hohen Dosisleistungen. Auch wenn sich die Anwendung der Strahlentherapie etabliert hat, entwickeln sich die Bestrahlungsverfahren weiter und werden zunehmend komplex. Beispiele hierfür sind die Modulation der Strahlstärke, die Verfügbarkeit hoher Dosisleistungsbetriebsarten, Arc-Therapie, die helikale fluenzmodulierte Strahlentherapie, Roboterarm-Beschleuniger und spezielle Geräte für die intraoperative Strahlentherapie. Die Gestaltung der Abschirmung von Behandlungsräumen hat sich diesen Veränderungen angepasst. Die mit den meisten dieser Verfahren verbundene Strahlungsbelastung kann sich auf die verwendeten Abschirmungsmaterialien auswirken. Das Bestrahlungsverfahren kann sich außerdem auf die bei der Berechnung der Abschirmung zu berücksichtigende Geometrie auswirken.

IEC 60601-2-1 behandelt die Gestaltung und Konstruktion der Beschleuniger, um ihre Betriebssicherheit sicherzustellen[1]. Darüber hinaus enthalten verschiedene nationale[2][3] oder internationale (IAEA Safety Reports Series Report No. 47, 2006) Berichte Empfehlungen zur Installation und für den Betrieb dieser Beschleuniger, der Sicherheitsvorrichtungen, der Gestaltung und Berechnung von Schutzvorrichtungen sowie zur radiologischen Steuerung und Überwachung. In bestimmten Ländern wurden nationale Normen eingeführt[4][5]. Des Weiteren schreiben nationale Verordnungen Regeln für den Strahlungsschutz und insbesondere in Bezug auf die Festlegung der Kontrollbereiche und die Berechnung der Abschirmung vor.

In Anbetracht der Entwicklung neuer Bestrahlungsverfahren und neuer Gestaltungen von Behandlungsräumen einerseits und der Vielzahl an Leitfäden oder normativen Dokumenten andererseits erscheint es gerechtfertigt, eine als allgemeines Rahmenwerk anzuwendende internationale Norm zu erstellen. Diese Norm ist als Ergänzung zu den anderen internationalen Normen (IEC und IAEA) vorgesehen.

Die Norm behandelt die folgenden Punkte:

- Arten von Beschleunigern: konventionelle Beschleuniger mit und ohne Ausgleichsfilter (FF- und FFF-Betriebsarten), Geräte für die helikale fluenzmodulierte Strahlentherapie und robotergestützte Beschleuniger, spezielle Geräte für die intraoperative Strahlentherapie;
- Strahlungsfelder: Elektronen, X-Photonen und Neutronen (direkt, gestreut, Durchlassstrahlung), Neutroneneinfang-Gammastrahlen;
- Behandlungsraumgeometrie: Labyrinth mit und ohne Tür, kein Labyrinth mit direkter Tür;
- Schutzmaterialien: Beton (normal oder hochdicht), Metalle, beschichtete Schutzwände (Beton und Metall), hydrierte Materialien, Erde und andere;
- Gestaltung der Strahlentherapie-Einrichtung;
- Berechnungsverfahren der Abschirmung einschließlich Neutronen, verschiedene Arten von Installationen und Abschirmungsgeometrien;
- Bewerten der Auswirkung des Labyrinths und Berechnung des Schutzes der Eingangstür;
- Bewerten der Auswirkung von Kanälen (Belüftung und Klimatisierung, Hochspannung und Flüssigkeiten) und zusätzlichen Schutzvorrichtungen;

- Annahmen und Ziele der Gestaltung der Abschirmung;
- Strahlungsanalyse der fertiggestellten Installation, um sicherzustellen, dass die nationalen Anforderungen erfüllt wurden und die Abschirmung sowie die Gestaltung für den Verwendungszweck nach der Installation des Beschleunigers geeignet sind.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm gilt für medizinische lineare Elektronenbeschleuniger, d. h. lineare Beschleuniger mit Nennstrahlenergien zwischen 4 MV und 30 MV einschließlich spezieller Installationen wie robotergestützter Geräte, helikaler fluenzmodulierter Strahlentherapiegeräte und spezieller Geräte für die intraoperative Strahlentherapie (IORT) mit Elektronen.

Für die Hadrontherapie eingesetzte Zyklotrone und Synchrotrone werden nicht berücksichtigt.

Die Strahlenschutzanforderungen und -empfehlungen in dieser Internationalen Norm behandeln die Aspekte in Bezug auf Verordnungen, die Ziele der Abschirmungsgestaltung und anderer Gestaltungskriterien, die Rolle der Hersteller, des Strahlungsschutzbeauftragten oder qualifizierten Experten und die Interaktionen zwischen Stakeholdern, Strahlungen im Umfeld eines linearen Beschleunigers, die Abschirmungen für konventionelle und spezielle Geräte (einschließlich Abschirmungsmaterialien und Übertragungswerte, Berechnungen für verschiedene Behandlungsraumkonfigurationen, die Auswirkung von Kanälen auf den Strahlenschutz) und die radiologische Überwachung (Messungen).

ANMERKUNG 1 Anhang A enthält Übertragungswerte für die häufigsten Abschirmungsmaterialien.

ANMERKUNG 2 Anhang B enthält unterstützende Daten für die Berechnung der Abschirmung.

ANMERKUNG 3 Anhang C enthält ein Beispiel für die Berechnung konventioneller Geräte und eines Standard-Labyrinths.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60976, *Medical electrical equipment — Medical electron accelerators — Functional performance characteristics*

IAEA Safety Reports Series Report No. 47, *Radiation protection in the Design of Radiotherapy Facilities (2006)*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60976 und die folgenden Begriffe.

3.1 Größen

3.1.1

Energiedosis

D

Quotient von $d\bar{\epsilon}$ durch dm , dabei ist $d\bar{\epsilon}$ die mittlere übertragene Energie auf die Massenmaterie dm

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: In diesem Dokument ist die absorbierte Dosis festgelegt als die durch einen linearen Beschleuniger erzeugte Strahlung an einem spezifischen Ort: die Wasser-Energiedosis im Isozentrum (1 m von der Quelle entfernt für konventionelle Geräte) bei einer Referenztiefe in Wasser im Elektronen-Beharrungszustand (zum Beispiel in der Tiefe der Maximaldosis).

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit der absorbierten Dosis ist Joule je Kilogramm ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) und trägt die Sonderbezeichnung Gray (Gy).

[QUELLE: ISO 12749-2:2013, 4.1.6.7]^[6]

3.1.2

Energiedosisleistung Ausbringungsleistung

DR_0

absorbierte Dosis je Zeiteinheit

Anmerkung 1 zum Begriff: In dieser Internationalen Norm ist die Energiedosisleistung in Abwesenheit spezifischer Angaben festgelegt als die durch einen linearen Beschleuniger erzeugte Strahlung an einem spezifischen Ort: die Wasser-Energiedosisleistung im Isozentrum (1 m von der Quelle entfernt für konventionelle Geräte) bei einer Referenztiefe in Wasser im Elektronen-Beharrungszustand (zum Beispiel in der Tiefe der Maximaldosis).

Anmerkung 2 zum Begriff: die Einheit der Energiedosisleistung ist Gray je Sekunde ($\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$). Die übliche Einheit für medizinische Beschleuniger ist Gray je Stunde ($\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$).

3.1.3

Äquivalentdosis H

Produkt von D und Q an einem Punkt im Gewebe, an dem D die Energiedosis (3.1.1) und Q der Qualitätsfaktor für die spezifische Strahlung an diesem Punkt ist, d. h.: $H = D \times Q$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit der Äquivalentdosis ist Joule je Kilogramm ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) und trägt die Sonderbezeichnung Sievert (Sv).

[QUELLE: ISO 12749-2:2013, 4.1.6.8]^[6]

3.1.4

IMRT-Verhältnis C_I

Verhältnis zwischen der mittleren Monitoreinheit je für die IMRT erforderlicher Einheit der Energiedosis (MU_{IMRT}) und der Monitoreinheit je Einheit der Energiedosis für die konventionelle Behandlung (MU_{conv})

$$C_I = \frac{MU_{\text{IMRT}}}{MU_{\text{CONV}}}$$

3.1.5

Momentanwert der Äquivalentdosisleistung IDR

„Umgebungs-/personenbezogene“ Äquivalentdosisleistung ($\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) gemessen mit dem linearen Beschleuniger bei Betrieb mit der Energiedosisleistung DR_0 ($\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$)

Anmerkung 1 zum Begriff: Dies ist der direkte Messwert des Dosismessgeräts, das eine stabile Messung der Äquivalentdosis je Stunde liefert. Die IDR wird an einem Bezugspunkt (30 cm) hinter der durchdrungenen Schutzwand gemessen.

3.1.6

effektive Dosis E

Summe aller Gewebe-Äquivalentdosen, jeweils multipliziert mit dem entsprechenden Gewebe-Wichtungsfaktor

3.1.7

Aufenthaltsfaktor

T

Anteil der Zeit, für die an den Behandlungsraum angrenzende Bereiche während des Betriebs des linearen Beschleunigers von einzelnen Personen oder Gruppen belegt sind

3.1.8

Richtungs- oder Nutzfaktor

U

Anteil der Zeit, während der die betrachtete Strahlung auf eine bestimmte Schutzwand gerichtet ist

3.1.9

Reflexionskoeffizient

α

Anteil der Strahlung (z. B. Fluenz, Energiefluenz), ausgedrückt durch das Verhältnis zwischen der zurückgestreuten und der auftreffenden Menge

3.1.10

Ziel der Gestaltung der Abschirmung

P

praktische Werte der Äquivalentdosis für eine einzelne Strahlentherapiequelle oder mehrere Quellen, bewertet an einem Bezugspunkt hinter einer Schutzwand

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Ziele der Gestaltung der Abschirmung stellen sicher, dass die entsprechenden Jahreswerte für den Grenzwert der effektiven Dosis in Übereinstimmung mit den nationalen Vorschriften oder IAEA/ICRP für kontrollierte und unkontrollierte Bereiche nicht überschritten werden.

3.1.11

(Patienten-) Streustrahlungsanteil

$a(\theta)$

Verhältnis zwischen der Energiedosis in einem Abstand von 1 m zu einem gewebeäquivalenten streuenden Objekt und der Energiedosis gemessen im Isozentrum nach Entfernung des Objekts

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Größe ist eine Funktion des Streuwinkels (θ), der Qualität des einfallenden Strahls und des Strahlbereichs. Ein Streuungsphantom ist üblicherweise ein wasseräquivalentes Phantom, das eine menschliche Normperson repräsentiert.

3.1.12

Zehntelwertabstand

TVD

Strecke, die eine spezifizierte Strahlung unter den Bedingungen eines breiten Strahlenfelds zurücklegt, um die Stärke des Strahlenfelds auf ein Zehntel ihres ursprünglichen Werts zu reduzieren

3.1.13

Zehntelwertebene

TVL

Dicke eines bestimmten Materials, das eine festgelegte Strahlenfeldstärke um einen Faktor von 10 ihres ursprünglichen Werts unter der Bedingung eines breiten Strahlenfelds reduziert

Anmerkung 1 zum Begriff: *TVL* wird ausgedrückt in m oder cm eines festgelegten Materials oder in kg/m^2 (Dicke $\times$ Dichte).

Anmerkung 2 zum Begriff: TVL_1 und TVL_2 sind die ersten und zweiten Zehntelwertdicken.

Anmerkung 3 zum Begriff: TVL_e ist die Zehntelwertebene im Beharrungszustand, die Dicke für jede weitere Zehntelwertebene in der Region, in der die gerichteten und spektral verteilten Strahlungsfelder praktisch unabhängig von der Dicke sind.

Anmerkung 4 zum Begriff: TVL_c ist die kumulative Zehntelwertebene, der Schätzwert basierend auf umfangreichen Schwächungsmessungen: für eine gegebene Dicke t , $TVL_c = -t/\log(B)$.

3.1.14

zeitgemittelte Äquivalentdosisleistung

TADR

schutzwandgeschwächte Äquivalentdosisleistung, gemittelt über einen festgelegten Zeitraum des Betriebs des Beschleunigers

Anmerkung 1 zum Begriff: Die *TADR* ist proportional zur momentanen Äquivalentdosisleistung (*IDR*) und hängt von dem Wert der Betriebsbelastung (*W*) und dem Richtungs- oder Nutzfaktor (*U*) ab.

3.1.15

Transmissionsfaktor (oder Schutzwandtransmission)

B

Verhältnis zwischen der Strahlenfeldstärke an einer Stelle hinter der Schutzwand, auf die die Strahlung einfällt, und der Feldstärke am gleichen Ort ohne eine Abschirmung für eine gegebene Strahlungsart und -qualität

Anmerkung 1 zum Begriff: *B* ist ein Messwert für den Abschirmungswirkungsgrad der Schutzwand.

3.1.16

Betriebsbelastung

W

mittlere Wasser-Energiedosis der durch einen linearen Beschleuniger erzeugten Strahlung im Isozentrum in einer Bezugstiefe in Wasser im Elektronen-Beharrungszustand über einen festgelegten Zeitraum, gemittelt über ein Jahr

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Betriebsbelastung wird in Gray (Gy) angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Zeitraum sollte mit den Zielen der Gestaltung der Abschirmung und der Betriebsbelastung konsistent sein.

Anmerkung 3 zum Begriff: Das Isozentrum befindet sich für konventionelle Geräte in einem Abstand von 1 m zur Quelle.

Anmerkung 4 zum Begriff: Die Bezugstiefe in Wasser ist beispielsweise die Tiefe der Maximaldosis.

3.2 Definitionen

3.2.1

Schutzwand (oder Strahlenschutzwand)

Strahlenschutzwand aus strahlungsschwächendem Material(ien) zur Reduzierung der Äquivalentdosis auf der Seite hinter der Strahlungsquelle auf ein akzeptables Maß in Übereinstimmung mit der nationalen Gesetzgebung oder internationalen Richtwerten

3.2.2

primäre Schutzwand

Wand, Decke, Boden oder andere Strukturen zur Schwächung der direkten von dem Ziel oder der Quelle durch die Kollimatoröffnung (Nutzstrahlenbündel) ausgestrahlten Strahlung auf ein akzeptables Maß in Übereinstimmung mit der nationalen Gesetzgebung oder internationalen Richtwerten

3.2.3

sekundäre Schutzwand

Wand, Decke, Boden oder andere Strukturen, die nicht von dem Hauptstrahlenbündel getroffen werden und gestaltet sind, um die Durchlass- und Streustrahlung auf ein akzeptables Maß in Übereinstimmung mit der nationalen Gesetzgebung oder internationalen Richtwerten zu reduzieren

3.2.4

Kontrollbereich

festgelegter Bereich, in dem spezifische Schutzmaßnahmen und Sicherheitsvorkehrungen erforderlich sind oder sein könnten, um Expositionen zu kontrollieren oder die Ausbreitung von Kontamination unter Normalarbeitsbedingungen zu verhindern und die Wahrscheinlichkeit und Größenordnung potenzieller Expositionen zu vermeiden oder zu begrenzen

Anmerkung 1 zum Begriff: Dies impliziert, dass der Zugang, die Belegung und die Arbeitsbedingungen zu Strahlenschutz Zwecken kontrolliert werden.

[QUELLE: IAEA BSS]^[7]

3.2.5

geometrische Feldgröße

geometrische Projektion, gesehen von dem Mittelpunkt der vorderen Oberfläche der Strahlungsquelle aus in einer Ebene senkrecht zur Strahlachse des Distalendes der Blendenvorrichtung oder des Kollimators

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Feld hat daher die gleiche Form wie die Öffnung der Blendenvorrichtung.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die projizierte Feldgröße wird daher in einem bestimmten Abstand zum Ziel festgelegt, z. B. im Isozentrum in einem Abstand von 1 m zum Ziel oder dem Bezugsabstand des Geräts.

[QUELLE: IEC 60976:2007]

3.2.6

helikale fluenzmodulierte Strahlentherapie

Strahlentherapie unter Verwendung eines linearen Beschleunigers, der die Behandlung mit einem Schlitzstrahl ermöglicht, der durch eine Lamellenblende (MLC) reguliert werden kann und kontinuierlich um den Patienten mit einer Geometrie entsprechend der diagnostischen Computertomographie (CT) mit konkomittierender Bewegung der Patientenliege rotiert

Anmerkung 1 zum Begriff: Die helikale fluenzmodulierte Strahlentherapie wird oftmals auch als Tomotherapie bezeichnet.

3.2.7

fluenzmodulierte Strahlentherapie

IMRT

Behandlungsverfahren, das im Allgemeinen die koordinierte Kontrolle der Photonen- oder Elektronenfluenz, der Strahlausrichtung relativ zum Patienten und der Strahlgröße in kontinuierlicher oder diskreter Weise nach einem vorgegebenen Behandlungsplan erfordert

Anmerkung 1 zum Begriff: Hauptzweck der IMRT besteht darin, die Konformität der Dosisverteilung mit dem geplanten Zielvolumen zu verbessern und gleichzeitig die Dosis in dem umgebenden gesunden Gewebe zu minimieren.

[QUELLE: IEC 60976:2007]

3.2.8

Isozentrum

Punkt, der durch den Schnittpunkt zwischen der Rotationsachse des Tragarms und der Strahlmittelachse eines linearen Beschleunigers festgelegt ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Isozentrum befindet sich für konventionelle lineare Beschleuniger in einem Abstand von 1 m zur Strahlungsquelle.

3.2.9

Durchlassstrahlung

Strahlung mit Ausnahme des Nutzstrahlenbündels aus dem Beschleunigerkopf und anderen Strahllinienkomponenten

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Durchlassstrahlung wird durch die Abschirmung im Behandlungskopf nach IEC 60601-2-1^[1] geschwächt.

3.2.10

Mitglieder der Öffentlichkeit

Personen, die nicht aus beruflichen Gründen einer betrachteten Quelle oder Praktik ausgesetzt sind

Anmerkung 1 zum Begriff: Patienten, die aufgrund der medizinischen Behandlung bestrahlt werden, gelten nicht als Mitglieder der Öffentlichkeit.

3.2.11

Nennenergie

vom Hersteller zur Charakterisierung des Strahlenbündels angegebene Energie

Anmerkung 1 zum Begriff: „MV“ wird zur Bezugnahme auf Beschleunigungsspannungen und die Endpunktenergie eines Bremsstrahlungsspektrums verwendet, während „MeV“ auf monoenergetische Photonen oder Elektronen verweist.

[QUELLE: IEC 60976:2007]

3.2.12

belegter Bereich

Raum oder andere Fläche in Innen- oder Außenbereichen, der/die wahrscheinlich regelmäßig oder gelegentlich von Personen als Arbeitsplatz, Wohnraum oder Erholungsbereich genutzt wird und in dem aufgrund von Strahlungsquellen in der Nähe ein ionisierendes Strahlungsfeld besteht

3.2.13

Strahlenschutzverantwortlicher

Person, die für Strahlenschutzangelegenheiten in Bezug auf eine gegebene Art von Praktik technisch kompetent ist und von dem Registranten, Lizenznehmer oder Arbeitgeber mit der Beaufsichtigung der Anwendung relevanter Anforderungen betraut wurde

[QUELLE: IAEA BSS]^[7]

3.2.14

qualifizierter Experte

Person, die aufgrund einer Zertifizierung durch entsprechende Organe oder Gesellschaften, einer Berufszulassung oder von akademischen Qualifikationen und Erfahrung als ausreichend sachkundig in dem relevanten Spezialgebiet wie etwa medizinische Physik, Strahlenschutz, Arbeitsmedizin, Brandschutz, Qualitätsmanagement oder relevanten technischen oder Sicherheitsfachbereichen anerkannt ist

[QUELLE: IAEA BSS]^[7]

3.2.15

robotergestützter Beschleuniger

Gerät, bestehend aus einem linearen Beschleuniger, der auf einem 6D-Roboterarm montiert ist, um eine multidirektionale Zuführung der Dosis zu ermöglichen

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Roboterarm hat 6 Freiheitsgrade, da er 3 translationale Bewegungen (X, Y und Z) und 3 Rotationsbewegungen ermöglicht.

Anmerkung 2 zum Begriff: Das „geometrische Isozentrum“ ist ein Bezugspunkt im Raum, der als Ursprung für mehrere Koordinatensysteme in Verbindung mit der Kalibrierung des Roboters und der Bildgebung dient.

3.2.16

Streustrahlung

Strahlung, die während des Durchgangs durch Materie ihre Richtung ändert und dabei üblicherweise gleichzeitig in ihrer Energie und Intensität geschwächt wird

3.2.17

Sekundärstrahlung

Strahlung, die durch Streuung von den durch primäre Röntgenstrahlen getroffenen Bereichen oder Durchlassstrahlung durch den Behandlungskopf des linearen Beschleunigers erzeugt wird

3.2.18

überwachter Bereich

festgelegter Bereich, in dem spezifische Schutzmaßnahmen und Sicherheitsvorkehrungen erforderlich sind oder sein könnten, um normale Expositionen unter Normalarbeitsbedingungen zu kontrollieren und potenzielle Expositionen zu vermeiden oder ihr Ausmaß zu begrenzen

3.2.19

Tertiärstrahlung

Strahlung, die durch Streuung von den durch Durchlassstrahlung, Sekundärstrahlung und primäre Elektronenstrahl-Bremsstrahlung getroffenen Bereichen erzeugt wird

4 Ziele der Gestaltung von Abschirmungen und andere Gestaltungskriterien

4.1 Ziele der Gestaltung der Abschirmung

Die Ziele der Gestaltung der Abschirmung (P) sind Werte der Äquivalentdosis (H), die für die Gestaltungsberechnungen und Beurteilungen von Schutzwänden zum Schutz der Mitarbeiter oder Mitglieder der Öffentlichkeit verwendet werden. Für überwachte, kontrollierte und öffentliche Bereiche können unterschiedliche Ziele der Gestaltung von Abschirmungen festgelegt werden. Diese Ziele müssen den Anforderungen bestehender nationaler Vorschriften oder, sofern diese nicht verfügbar sind, der grundlegenden IAEA-Sicherheitsnormen zum Strahlenschutz in Bezug auf die effektiven Dosisgrenzwerte für Mitarbeiter und Mitglieder der Öffentlichkeit genügen.

Der von den nationalen Behörden festgelegte P -Wert (Sv) sollte eine Fraktion des Dosisgrenzwerts für Mitarbeiter oder Mitglieder der Öffentlichkeit sein. Diese Werte können als wöchentliche Werte (mSv/week) angegeben werden, da die Betriebsbelastung (W) für ein Strahlentherapiegerät traditionell ein wöchentliches Format hat. In Übereinstimmung mit den nationalen Vorschriften können auch andere Zeiträume verwendet werden.

Die Ziele der Gestaltung der Abschirmung (P) sind praktische Werte, die an einem Bezugspunkt hinter einer Strahlenschutzwand für die von der Strahlentherapieabteilung vorgeschlagene Betriebsbelastung W bewertet werden.

4.2 Annahmen zur Gestaltung der Abschirmung

Eine Strahlentherapieeinrichtung, die die oben vorgeschlagenen Annahmen verwendet, würde effektive Dosiswerte unter den vorgeschriebenen Grenzwerten für überwachte, kontrollierte und öffentliche Bereiche erzeugen. Dies ist das Ergebnis der konservativ sicheren Natur der empfohlenen Abschirmungsgestaltungsmethodologie.

Einige Gestaltungsannahmen sollten getroffen werden:

- Es wird ein Mindestabstand zwischen dem belegten Bereich und einer abgeschirmten Wand (oder Schutzwand) von 0,3 m angenommen (gilt als repräsentativ für die Ganzkörper-Exposition).
- Die Schwächung des Primärstrahls durch den Patienten sollte vernachlässigt werden.
- Berechnungen der empfohlenen Dicke der Schutzwand für die Hauptschutzwand nehmen ein rechtwinkliges Auftreffen der Strahlung an; mit Ausnahme von robotergestützten Beschleunigern, für die ein schräger Einfall berücksichtigt werden sollte.
- Für Durchlassstrahlung aus Strahlentherapiegeräten wird der durch IEC 60601-2-1^[1] für das Strahlentherapiegerät empfohlene Höchstwert angenommen, auch wenn die Durchlassstrahlung in der Praxis oftmals unter diesem Wert liegt.
- Die Breite der Hauptschutzwand (w) muss ausreichend sein, um mindestens 0,3 m über den Rand eines geometrischen Felds mit maximaler Größe gedreht um 45° hinauszuragen. Für ein quadratisches $f \text{ m} \times f \text{ m}$ Feld ist der kleinste Wert von w gegeben durch:

$$w = (f/1 \text{ m})\sqrt{2d_N} + 0,6 \text{ m} \quad (1)$$

dabei ist d_N der Abstand zwischen dem Ziel und der abgewandten Seite des engsten Teils der Schutzwand in Metern.

Der Abstand zwischen dem Ziel und dem engsten Punkt der Hauptschutzwand sollte an der Oberseite der Schutzwand und nicht in der Höhe des Isozentrums gemessen werden.

Bild 1 zeigt die üblichen Positionen für den engsten Punkt der Schutzwand.

Maße in Meter

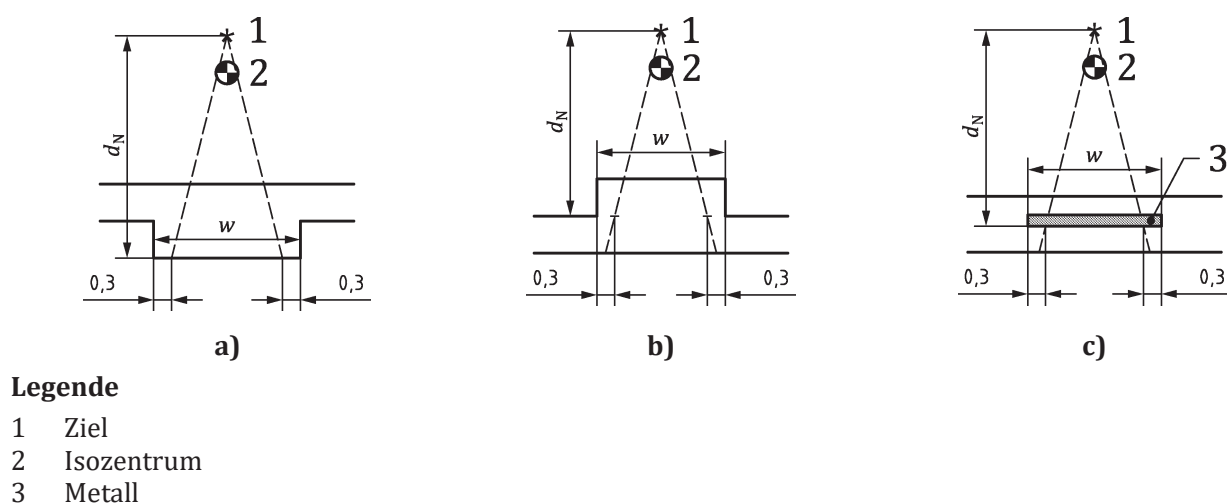


Bild 1 — Breite der Hauptschutzwand

5 Rollen der Hersteller, des Strahlenschutzverantwortlichen oder qualifizierten Experten und Interaktionen zwischen Stakeholdern

5.1 Allgemeines

Das Sicherstellen eines adäquaten Schutzes für die Mitarbeiter der Einrichtung und die allgemeine Öffentlichkeit vor der Strahlung eines linearen Beschleunigers ist ein kooperativer Aufwand. Abschnitt 5 enthält eine allgemeine Anleitung zu den Rollen, Verantwortlichkeiten und Interaktionen zwischen den verschiedenen an dem Prozess beteiligten Stakeholdern.

5.2 Hersteller des linearen Beschleunigers

Der Hersteller des linearen Beschleunigers muss ausführliche technische Dokumente vorlegen, die mindestens die folgenden Informationen enthalten:

a) Maßdatenblätter mit:

- den Abmessungen des linearen Beschleunigers;
- den Mindestabmessungen des Behandlungsraums (Länge, Breite und Höhe) für den Beschleuniger selbst, aber auch für die volle Ausdehnung der Behandlungsliege in jede Richtung. Für isozentrische Geräte muss der lichte Abstand zwischen Isozentrum und Wand sowie der Mindestabstand zwischen Boden und Decke des Behandlungsraums festgelegt werden. Für nicht-isozentrische Geräte muss die mögliche Richtung des primären Strahls beschrieben und die Höhe des Isozentrums sowie sein Abstand zu der hinteren Wand festgelegt werden;
- Mindestabmessungen, Lage und Anforderungen für den Bedienungsraum. Spezifikation und Lage innerhalb oder außerhalb des Behandlungsraums, der technischen Räume, die Teile der notwendigen Zusatzeinrichtungen des Beschleunigers enthalten können;
- Informationen zu Kanalführungsanforderungen für Stromkabel, Wasserleitungen, Heizungs-, Belüftungs- und Klimaanlagekanäle usw., die für den Betrieb der Einrichtung in dem Behandlungsraum erforderlich sind.

b) Funktionale Leistungsmerkmale

Bei der Gestaltung der Strahlenschutzabschirmung sind die verschiedenen Arten der von dem Beschleuniger emittierten Strahlungen nach Angabe des Herstellers zur berücksichtigen. Diese Angaben müssen mindestens Folgendes enthalten:

- den Bezugsabstand in m, festgelegt für:
- Röntgenstrahlung: der festgelegte Abstand, gemessen entlang der Strahlachse von der Quelle der Röntgenstrahlung (vordere Oberfläche des Röntgenstrahlungsziels) zum Isozentrum oder einer festgelegten Ebene für nicht-isozentrische Geräte;
- Elektronenstrahlung: der festgelegte Abstand, gemessen entlang der Strahlachse von der virtuellen Elektronenquelle zum Isozentrum oder zu einer festgelegten Ebene für nicht-isozentrische Geräte;
- die verfügbaren Nennenergien des Strahls und die damit verbundenen Energiedosisleistungen in einem Bezugsabstand unter den Bedingungen des maximalen Aufbaus in einem Phantom (maximale Dosis) für ein Bezugsfeld $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ oder eine festgelegte Bezugsfeldgröße und die maximalen Strahlungsfelder für Röntgenstrahlung und Elektronenstrahlung.

Zusätzlich zu der Nennenergie des Strahls muss das Verfahren zum Erreichen einer gleichmäßigen Dosis für klinische Röntgenstrahlen erwähnt werden: mit Ausgleichsfilter (FF) oder ohne Ausgleichsfilter (FFF). Die

FF-Streuphotonen sind eine der Hauptquellen der Kopfstreuung linearer Beschleuniger. Die FFF-Betriebsart führt zu einer erhöhten Dosisleistung, einem weicheren Röntgenstrahlungsspektrum und einer Reduzierung der Streustrahlung des Kopfes, sodass die Rate der Photoneutronenerzeugung für die FF- und FFF-Betriebsarten im Wesentlichen gleich ist.

Für die Anwendung dieser Internationalen Norm gilt die Annahme, dass die Dosisleistung im Bezugsabstand für größere Abstände nach dem Abstandsquadrat-Gesetz erreicht werden kann.

- die bemessene Form des größten geometrischen Strahlenfelds im Bezugsabstand für die Röntgenstrahlung und Elektronenstrahlung für jede verfügbare Strahlungsart;
- die höchste Wasser-Energiedosisleistung der Neutronenstrahlungskontamination in Röntgen- und Elektronenstrahlen soweit diese für Strahlenschutzmaßnahmen gegen Neutronen erforderlich ist;
- die höchste Wasser-Energiedosisleistung der Röntgenstrahlungskontamination im Elektronenstrahl;
- die Verteilung der höchsten Durchlassstrahlung (Röntgenstrahlung und Neutronen); die räumliche Verteilung der Energiedosisleistung der aus der Strahlungsquellenbaugruppe austretenden Strahlung außerhalb des Querschnitts des maximalen Strahlenbündels für den Betriebszustand und die Betriebsparameter, bei denen die höchsten Dosisleistungen außerhalb des Strahlenbündels auftreten;

Diese Verteilung kann beispielsweise in Form von Isodosis-Datenblättern oder durch einen analytischen Ausdruck, aus dem die höchste Dosisleistung für jeden umgebenden Bereich bestimmt werden kann, festgelegt werden.

- Verfügbarkeit eines Beam-Stoppers und einer Beschreibung der geometrischen Eigenschaften (größter primärer Strahl und Winkel der abgefangenen Streustrahlung, Abstand zum Bezugspunkt usw.), Art und Dicke des Abschirmungsmaterials und Schwächungsfaktor für den primären Strahl.

5.3 Lieferant des Abschirmungsmaterials

Der Abschirmungslieferant ist für die Vorlage präziser Zeichnungen und Informationen zur Beschreibung seiner Produkte zur Bewertung der Anwendung in der Abschirmung verantwortlich.

Die üblichen Materialien für die Strahlenabschirmung sind normaler oder hochdichter Beton, Stahl oder Blei, für die die Dämpfungseigenschaften (*TVL*) hinreichend bekannt und mit der Dichte verbunden sind.

Die meisten veröffentlichten Daten nehmen für Beton eine Dichte von $2\,350\text{ kg.m}^{-3}$; es wurden jedoch auch Schwankungen je nach verwendeten Zuschlagstoffen festgestellt. Jeder Beton mit einer Dichte von mehr als $3\,000\text{ kg.m}^{-3}$ kann als hochdichter Beton betrachtet werden. Die erhöhte Dichte wird durch Hinzugabe verschiedener Zuschlagstoffe mit höherer Dichte erreicht, um die Photonenschwächung zu erhöhen. Häufig verwendete Materialien sind Eisenerze und Mineralien (Hämatit, Limonit, Magnetit usw.).

Der Lieferant des Abschirmungsmaterials sollte:

- die Gesamtdichte und Zusammensetzung des Abschirmungsmaterials angeben. Wenn Monte-Carlo-Berechnungen durchgeführt werden, sind weitere Informationen zu der Art der Zusammensetzung nach Gewicht für die verschiedenen Bestandteile der Mischung (Zuschlagstoff, Zement, zusätzliches Material, Wasser in %) und die atomare Zusammensetzung der verschiedenen Elemente (Ca, Fe, H, O, Si... in %), die für die Bewertung der Abschirmungseigenschaften relevant sind, anzugeben.
- in Zusammenarbeit mit dem Bauingenieur die Qualitätskontrolle des hergestellten Betons sicherstellen, um die erforderliche Dichte zu erreichen. Andernfalls sind Anpassungen erforderlich, um die nötige Dichte der Strahlenschutzwand zur Erreichung des Abschirmungsziels zu bestimmen.

Anstelle von Beton sind vorgeformte hochdichte ineinandergreifende Blöcke mit unterschiedlicher Dichte im Handel erhältlich oder es werden spezifische patentierte Bauverfahren wie etwa Trockenmineralfüllungen zwischen Fertigbetonwänden eingesetzt.

Wenn die vorgenannten benötigten Daten nicht verfügbar sind, muss der Lieferant die Strahlungsschwächungseigenschaften wie etwa *TVL* für Röntgenstrahlen oder Neutronen im Energiebereich des Beschleunigers und alle verfügbaren relevanten Daten vorlegen. Für mit mehr als 8 MV betriebene Therapieeinrichtungen sollte die Aktivierung des Materials innerhalb der Abschirmung berücksichtigt und verfügbare Daten sollten vorgelegt werden.

Lineare Beschleuniger, die mit Nennenergien des Strahls von mehr als 8 MV betrieben werden, können eine Türabschirmung für Neutronen und Photonen erfordern; der Türlieferant muss alle relevanten Daten für die Beurteilung der Schwächungseigenschaften hinsichtlich der Dicken und der Zusammensetzung der Schichten angeben.

5.4 Architektenbüro/Bauunternehmer

Um sicherzustellen, dass die Einrichtung nach den Absichten des Lizenznehmers errichtet wird, sollten die folgenden Verantwortlichkeiten in dem Vertrag zwischen dem Architektenbüro und dem Bauunternehmer festgelegt werden.

Das Architektenbüro ist für die Untersuchung der bestehenden Bauten (sofern vorhanden) verantwortlich. Dies umfasst die Bereitstellung von Informationen zu der derzeitigen und geplanten Nutzung des Bereichs um den linearen Beschleuniger. Der Architekt muss darüber hinaus Zeichnungen erstellen, die den Standort des installierten linearen Beschleunigers sowie die Lage und Art der Abschirmung um den linearen Beschleuniger genau angeben. Darüber hinaus muss das Architektenbüro den Abschirmungsbeurteilungsbericht prüfen, um sicherzustellen, dass die in dem Bericht beschriebene Abschirmung in die Gestaltung eingebunden wird. In einigen Fällen können bestimmte oder alle Aufgaben des Architekten von einem Bauunternehmer oder Abschirmungslieferanten übernommen werden.

Der Bauunternehmer ist dafür verantwortlich, sicherzustellen, dass die Einrichtung mit einer Abschirmung in Übereinstimmung mit dem Abschirmungsbeurteilungsbericht errichtet wird. Der Bauunternehmer muss darüber hinaus sicherstellen, dass der Strahlenschutzverantwortliche oder qualifizierte Experte über die erforderlichen genauen Zeichnungen und anderen relevanten Informationen verfügt, um ein genaues Verständnis der Bauten zu erhalten. Der Bauunternehmer muss mit dem Strahlenschutzverantwortlichen oder qualifizierten Experten jede während der Errichtung auftretende Situation, die die Abschirmung beeinträchtigen kann, koordinieren. Insbesondere die Abschirmung für Orte mit baulichen Einschränkungen muss zwischen den Stakeholdern koordiniert werden.

5.5 Strahlenschutzverantwortlicher oder qualifizierter Experte

Der Strahlenschutzverantwortliche oder qualifizierte Experte für die Installation des Elektronenbeschleunigers muss in enger Zusammenarbeit mit den anderen Stakeholdern (Arzt, Strahlenonkologe usw.) ausführliche Dokumente mit den notwendigen Spezifikationen für die Errichtung und den geplanten Betrieb vorlegen. Für den Abschirmungsplan sind konservative Abschimmungsannahmen zu treffen, um das Abschimmungsziel zu erreichen. Diese Abschimmungsannahmen sollten jedoch auch realistisch sein.

Die Dokumente müssen Informationen in Übereinstimmung mit den nationalen Vorschriften enthalten. Sie müssen mindestens die folgenden Spezifikationen enthalten:

- Zeichnungen der Gebäude, Räume und externen Einrichtungen der Strahlentherapieabteilung und aller benachbarten Gebäude, Räume und Verkehrsbereiche, aus denen die erforderlichen Abmessungen und Abstände für die Strahlenschutzberechnungen abgeleitet werden können;
- Daten zur bestehenden Gebäudestruktur (Material, Dicke);

- die Aufteilung der Räume innerhalb der Strahlentherapieabteilung und ihre Nutzung;
- Arbeitsplätze und belegte Bereiche innerhalb der Strahlentherapieabteilung;
- Spezifikationen bezüglich der vorgesehenen Abgrenzung von Überwachungsbereichen, Kontrollbereichen und Sperrbereichen;
- Art und Nutzung der Bereiche außerhalb der Strahlentherapieabteilung und die damit verbundenen Belegungsfaktoren T für unkontrollierte Bereiche auf der Grundlage konservativer Annahmen;
- Einzelheiten zu den geplanten Betriebsarten [Kombination aus Strahlungsart, Strahlungsenergie, einschließlich FF- und FFF-Betriebsart, Strahlrichtung und dementsprechend die Bestimmung des Richtungs- oder Nutzungsfaktors U , mögliche Positionen des Strahlerkopfs, fluenzmodulierte Strahlentherapie (IMRT) und Nutzfrequenz];
- die maximale Anzahl jeder Art von geplanter Behandlung und die damit verbundene mittlere Dosis am Bezugspunkt während des Bezugszeitraums, die für die Erreichung des Abschirmungsziels festgelegt wurden. (Betriebsbelastung);
- spezifische Anforderungen hinsichtlich der Art der geplanten Behandlungen und ihres Einflusses auf die Abmessungen des Behandlungsraums. Beispielsweise erfordert eine Ganzkörperbestrahlung (TBI) einen größeren Behandlungsabstand zu einer Wand. Für intraoperative Verfahren (IORT), die umfangreiches unterstützendes Personal und Geräte erfordern, muss der Raum gegebenenfalls größer sein.

Der Strahlenschutzverantwortliche oder qualifizierte Experte sollte einen Abschirmungsbewertungsbericht vorlegen, der nachweist, dass die Schutzwände in der baulichen Struktur (Materialtyp, Dicke und Lage) einen angemessenen Schutz für die Mitarbeiter und die allgemeine Öffentlichkeit bieten. Der Bericht muss klare Angaben zu allen für die Gestaltung der Abschirmung verwendeten Annahmen enthalten. Er muss sicherstellen, dass nach der Installation der Maschine eine Strahlungsanalyse durchgeführt und ein Bericht vorgelegt wird, der nachweist, dass die Dosisleistung außerhalb der baulichen Umhüllung des linearen Beschleunigers für die Belegung durch die Mitarbeiter und, für Orte mit unkontrolliertem Zugang, die allgemeine Öffentlichkeit geeignet ist.

5.6 Der Lizenznehmer

Der Strahlungsanalysebericht muss nach den lokalen oder nationalen Vorschriften von einem Vertreter des Lizenznehmers an die zuständige Aufsichts- oder Genehmigungsbehörde zur Genehmigung vor der klinischen Inbetriebnahme vorgelegt werden.

6 Strahlungsfelder um einen linearen Elektronenbeschleuniger

6.1 Allgemeines

Verschiedene Strahlungskomponenten tragen zu der Umgebungsäquivalentdosisleistung an einem gegebenen Punkt außerhalb des Behandlungsraums bei:

- Röntgenstrahlung
 - primäres Röntgenstrahlenbündel;
 - primäre Elektronenstrahl-Bremsstrahlung;
 - Durchlassröntgenstrahlung;
 - Streuröntgenstrahlung;

- tertiäre Röntgenstrahlung;
- Neutronenstrahlung (primärer Röntgenstrahl > 8 MV)
 - direkte Neutronenstrahlung;
 - Streu- und thermische Neutronenstrahlung;
 - Neutronenstrahlung an der Hauptschutzwand;
- γ -Strahlung (primäre Röntgenstrahlung > 8 MV)
 - Labyrinth- γ -Strahlung;
 - Tür- γ -Strahlung;
 - Hauptschutzwand- γ -Strahlung.

6.2 Röntgenstrahlung

6.2.1 Primäres Röntgenstrahlenbündel

Das primäre Röntgenstrahlenbündel ist die durch den Kopf des Beschleunigers erzeugte und zur Behandlung der Patienten verwendete kollimierte Röntgenstrahlung. Hierbei handelt es sich um eine Bremsstrahlung, die durch Verlangsamung der beschleunigten Elektronen in einem dicken Target mit hoher Atomzahl (Wolfram, Gold) erzeugt wird. Die Auswahl der für die Abschreibungsberechnungen zu verwendenden Transmissionskurven für die Hauptschutzwände muss die polyenergetische Natur des Spektrums und die Breitbandgeometrie berücksichtigen^{[8][9]}. Der von den Herstellern verwendete Begriff „Nennenergie“ bezieht sich nicht notwendigerweise auf die Beschleunigungsspannung, sondern auf BJR-11- oder BJR-17-Festlegungen^{[10][11]}.

Besondere Aufmerksamkeit ist bei der Festlegung der Nennenergie des Strahls geboten, da diese sich im Verlauf der Zeit entsprechend den verschiedenen Energiespektren geändert hat (siehe Tabelle 1)^[12]. Bei der Berücksichtigung der veröffentlichten Daten für die primäre Röntgenstrahlungs-transmissionsberechnung müssen die Energiefestlegung in Verbindung mit den Daten und die Energiefestlegung des zu installierenden Beschleunigers geprüft werden. Ein konservativer Ansatz besteht grundsätzlich darin, Daten in Verbindung mit der Energiefestlegung BJR 11 zu verwenden.

Tabelle 1 — Vergleich der BJR-11- und BJR-17-MV-Festlegungen

BJR 11 (MV)	4	6	10	15	18	20	24
BJR 17 (MV)	4	6	10	16	23	25	30

Lineare Elektronenbeschleuniger erzeugen grundsätzlich Röntgenstrahlenbündel mit einer einzelnen Nennenergie (üblicherweise 6 MV) oder mehreren Nennenergien (zwischen 6 MV und 18 MV).

6.2.2 Primäre Elektronenstrahlbremsstrahlung

Lineare Elektronenbeschleuniger erzeugen auch Elektronenstrahlbündel, die für die Behandlung von Patienten eingesetzt werden, mit üblicherweise 5 oder 6 möglichen Energien (zwischen 4 MeV und ungefähr 20 MeV). Konventionelle Beschleuniger erzeugen Breitelektronenstrahlbündel durch Streufilter.

Der primäre Elektronenstrahl wird mit Röntgenstrahlbremsstrahlung mit zwei unterschiedlichen Komponenten kontaminiert:

- Röntgenstrahlen im Elektronenstrahlbündel;
- Röntgenstrahlen, die durch das Elektronenstrahlbündel außerhalb des linearen Beschleunigers (d. h. in der Luft, im Patienten und in den primären Abschirmungen) erzeugt werden.

Da die Dicke der Abschirmung gegen die durch das Elektronenstrahlbündel erzeugte Bremsstrahlung in jedem Fall größer ist als der Elektronenbereich, genügt es, die Abschirmungsanforderungen für die Bremsstrahlung zu berechnen (für die primären Elektronen ist keine zusätzliche Abschirmung erforderlich).

6.2.3 Sekundäre Röntgenstrahlung

Die sekundäre Röntgenstrahlungskomponente besteht aus zwei Komponenten: Durchlassstrahlung und Streustrahlung.

Die Durchlassstrahlungskomponente der Röntgenstrahlung ist eine Bremsstrahlung, die im Kopf des linearen Beschleunigers erzeugt und durch die Kopfabschirmung außerhalb der durch die Blendenvorrichtung festgelegten Region übertragen wird.

Das Energiespektrum der Durchlassstrahlung wird im Vergleich zu dem primären Röntgenstrahlenbündel aufgeweicht, was zu anderen Transmissionswerten führt^[8]. Dies sollte bei den Abschirmungsberechnungen berücksichtigt werden. Ein konservativer Ansatz besteht jedoch darin, die Durchlasskomponente mit denselben Transmissionswerten wie für den primären Strahl zu berücksichtigen.

IEC 60601-2-1^[1] legt die Gestaltungsanforderungen für lineare Beschleuniger fest, um die Exposition aufgrund von Durchlassröntgenstrahlen zu begrenzen, und gibt den maximalen zulässigen Beitrag zu der Äquivalentdosis um den linearen Beschleuniger an.

Streustrahlung, die aus den Auftreffbereichen des primären Röntgenstrahlenbündels stammt:

- durch den Patienten gestreute sekundäre Röntgenstrahlen;
- durch eine Hauptschutzwand gestreute sekundäre Röntgenstrahlen.

Das Energiespektrum der gestreuten Photonen ist im Vergleich zu dem primären Photonenstrahlbündel reduziert; die mittlere Energie nimmt mit zunehmendem Streuwinkel ab. Dies führt zu unterschiedlichen Transmissionswerten für verschiedene Streuwinkel.

Die Streustrahlungsintensität hängt von der Energie des primären Strahlbündels, dem Streuwinkel und, für durch eine Schutzwand gestreute Photonen, von dem Einfallswinkel und dem Material der Schutzwand ab (Wandreflexionskoeffizient).

Referenzen:

- gestreut durch den Patienten: Fraktion, Energie und TVL: [IAEA SRS 47]^{[2][13]};
- gestreut durch die Schutzwand: Wandreflexionskoeffizienten: [IAEA SRS 47]^{[2][14]}.

Diese Einflüsse sollten bei Abschirmungsberechnungen berücksichtigt werden. Ein konservativer Ansatz besteht darin, für kleine Streuwinkel zu berücksichtigen, dass die gestreute Komponente dieselben Transmissionswerte hat wie das primäre Strahlbündel.

6.2.4 Tertiäre Röntgenstrahlung

Tertiäre Röntgenstrahlung stammt aus den Auftreffbereichen der sekundären Röntgenstrahlung sowie dem Auftreffbereich der primären Elektronenbremsstrahlung. Im Fall von Einrichtungen mit einem Labyrinth

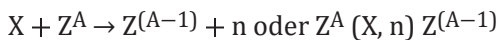
erreicht die tertiäre Röntgenstrahlungskomponente die Eingangstür und sollte daher für die Abschirmungsbewertung des Eingangs berücksichtigt werden.

Die Energie der tertiären Strahlung ist im Vergleich zu dem primären Photonenstrahlbündel reduziert und dieser Punkt muss bei den Abschirmungsberechnungen berücksichtigt werden.

6.3 Neutronenstrahlung

6.3.1 Allgemeines

Röntgenstrahlen oberhalb eines gegebenen Einfalls auf einen Nukleus (Atomzahl Z , Massenzahl A) erzeugen photonukleare Reaktionen nach:



Damit dies stattfinden kann, muss die Photonenenergie höher sein als die Bindungsenergie des kleinsten gebundenen Nukleons. Der Wert dieser Schwellenenergie ist von der Atomzahl Z abhängig (siehe Tabelle 2)^{[15][16]}.

In der Praxis wird die Photoneutronenproduktion für Strahlenschutzaspekte signifikant, wenn die Nennenergie des primären Röntgenstrahlenbündels höher als 8 MV ist. Neutronen werden im Kopf des linearen Beschleunigers und in der Hauptschutzwand erzeugt.

Der dominante Mechanismus der Photoneutronenproduktion im Energiebereich linearer Beschleuniger ist die Dipol-Riesenresonanz. Demzufolge:

- kann die Emission von Neutronen als isotrop betrachtet werden^[17];
- wird das Energiespektrum durch eine Maxwell-Verteilung mit einer mittleren Energie von ungefähr 1-2 MeV für schwere Kerne^[14] beschrieben und die mittlere Neutronenenergie kann als von der Nennenergie des Röntgenstrahlenbündels unabhängig angesehen werden^[18];
- die Photoneutronenausbeute erhöht sich mit zunehmender Nennenergie des Strahls^{[2][19][20]}.

Für eine gegebene Nennenergie hängt die Photoneutronenausbeute von dem Modell des linearen Beschleunigers ab, weil das Röntgenstrahlungsspektrum erheblich je nach Modell variieren kann^{[9][21][22]}. Für ein gegebenes Modell hängt die Neutronenfluenz von den sekundären und tertiären Kollimationseinstellungen ab^{[23][24]}.

Die Neutronenproduktion in der Elektronenbetriebsart ist sehr viel geringer als in der Photonenbetriebsart, hauptsächlich, weil die direkte Produktion von Neutronen durch elektronen-nukleare Reaktionen um mindestens zwei Größenordnungen geringer ist als die photonukleare Produktion.

Die obigen Eigenschaften der Neutronenproduktion sind für die Zwecke des Strahlenschutzes um einen linearen Beschleuniger zu berücksichtigen.

Tabelle 2 — Schwellenenergien und photonukleare Reaktionsquerschnitte für übliche Nuklide^{[15][16]}

Element	Massenzahl A	Abundanz %	E_{th} MeV	σ_{max} mb
C	12	98,9	18,7	< 10
N	14	99,6	10,6	$\cong$ 15
O	16	99,8	15,7	$\cong$ 10
Cr	52	83,8	12,0	$\cong$ 70
	53	9,5	7,9	$\cong$ 70
Mn	55	100	10,2	$\cong$ 70
Fe	56	91,7	11,2	$\cong$ 60
Ni	58	68,1	12,2	$\cong$ 25
	60	26,2	11,4	$\cong$ 70
Cu	63	69,2	10,8	$\cong$ 80
	65	30,8	9,9	$\cong$ 90
W	182	26,3	8,1	$\cong$ 400
	183	14,3	6,2	$\cong$ 450
	184	30,7	7,4	$\cong$ 400
	186	28,6	7,2	$\cong$ 400
Au	197	100	8,1	$\cong$ 550
Pb	206	24,1	8,1	$\cong$ 600
	207	22,1	6,7	$\cong$ 600
	208	52,4	7,4	$\cong$ 650

6.3.2 Direkte Neutronenstrahlung

Direkte Neutronenstrahlung ist die im Kopf des linearen Beschleunigers produzierte Neutronenkomponente. Die Neutronenproduktion im Kopf entsteht hauptsächlich durch (γ, n) Reaktionen in Wolframmaterialien (Ausgleichsfilter, Hauptkollimator, Klemmen, MLC ...).

Aufgrund der Eigenabschirmung des Kopfs (W oder Pb) unterscheiden sich die Eigenschaften des Neutronenfelds außerhalb der durch nicht verstellbare Blendenvorrichtungen festgelegten Region (Durchlassneutronen) von den Eigenschaften der Neutronen innerhalb des Felds: Das Energiespektrum wird durch unelastische Streuungsreaktionen (n , $2n$) verringert und die Fluenz wird um einen Faktor von ungefähr 2 reduziert^{[15][23][25]}. Da der durch die Primärblende festgelegte maximale Raumwinkel und die maximale einstellbare Feldgröße nur 1 % von 4π betragen, ist die Hypothese, dass alle direkten Neutronen Durchlassneutronen sind, eine gute Schätzung.

Auch wenn die Neutronenproduktion an verschiedenen Stellen in dem linearen Beschleunigerkopf stattfindet, darf diese durch Anwendung des Divergenzpunkts des primären Röntgenstrahlenbündels als alleinige Neutronenquelle des Kopfs des linearen Beschleunigers geschätzt werden. Die Fluenz der direkten Neutronenkomponente als direkte Funktion des Abstands zur Quelle kann durch ein Abstandsquadrat-Gesetz beschrieben werden.

6.3.3 Streu- und thermische Neutronenstrahlung

Direkte Neutronen werden von den Wänden, dem Boden und der Decke des Behandlungsraums gestreut und teilweise thermalisiert. Aus diesem Grund wird das Neutronenenergiespektrum um den linearen Beschleuniger in Vergleich zu dem direkten Neutronenspektrum aufgeweitet: Dies ist die Konsequenz der Kombination aus direkten, gestreuten und thermalisierten Neutronen^[15].

Die Fluenz der indirekten Neutronenkomponente kann nicht durch das Abstandsquadrat-Gesetz als Funktion des Abstands zu der Quelle beschrieben werden^{[15][26]}.

In einer Einrichtung mit einem Labyrinth erreicht ein Teil der in dem Behandlungsraum erzeugten Neutronen die Eingangstür und diese Neutronenkomponente muss für die Bewertung der Eingangsabschirmung berechnet werden.

6.3.4 Neutronenstrahlung an der Hauptschutzwand

Wenn die Nennenergie des Photonenstrahlbündels höher als 8 MV ist, werden Neutronen auch in den von dem primären Röntgenstrahlenbündel getroffenen Schutzwänden erzeugt. Je nach Zusammensetzung und Dicke der Schutzwände können diese Neutronen erheblich zu der Exposition außerhalb des Behandlungsraums beitragen oder auch nicht.

Bei Betonschutzwänden (normaler oder hochdichter Beton) wird die Neutronenproduktion in der Schutzwand erheblich durch Selbstschwächung kompensiert, sodass der Beitrag außerhalb des Raums unwesentlich ist^[15].

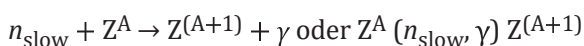
Wenn eine Schutzwand einen hohen Anteil an metallischen Bestandteilen enthält, kann die Neutronenproduktion in der Schutzwand wesentlich sein und nicht durch Selbstschwächung kompensiert werden. In diesem Fall sollte die in der Schutzwand erzeugte Neutronenstrahlung bei Abschirmungsberechnungen berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere, wenn Wände oder Decken durch eine oder mehrere Blei- oder Stahlschichten verstärkt werden^{[27][28]}.

6.4 γ -Strahlung

6.4.1 Allgemeines

Wenn die Nennenergie des primären Röntgenstrahlenbündels höher als 8 MV ist, wird sekundäre γ -Strahlung zusammen mit den Neutronen erzeugt. Die γ -Komponente entsteht aus den folgenden zwei Prozessen:

- langsamer Neutroneneinfang (siehe Tabelle 3):



- photonukleare Reaktion mit Entregung des neuen Kerns^[2]:



6.4.2 Labyrinth- γ -Strahlung

Langsamer Neutroneneinfang tritt hauptsächlich in Abschirmungsmaterialien in einem Labyrinth auf. Normaler oder hochdichter Beton enthält Elemente mit nicht zu vernachlässigenden Neutroneneinfang-Querschnitten: Si, Ca, S, Fe, Ba. Für normalen Beton beträgt die mittlere Energie der emittierten γ -Strahlen 3,6 MeV und die maximale Energie ungefähr 10 MeV^{[15][29]}.

Die γ -Komponente, die die Eingangstür erreicht, muss zum Zweck der Bewertung der Abschirmung des Eingangs berechnet werden^[2].

6.4.3 Tür- γ -Strahlung

Langsamer Neutroneneinfang tritt auch an der Tür auf, insbesondere wenn diese boriertes Polyethylen (BPE) enthält. Türen haben üblicherweise eine mehrschichtige Struktur, die aus aufeinanderfolgenden Schichten aus wasserstoffreichem Material (Paraffin, Polyethylen oder boriertes Polyethylen) und Metall (Stahl (Fe, Ni, Cr) oder Blei) oder aus drei Schichten aus Metall, wasserstoffreichem Material und Metall besteht.

Die in der Tür erzeugte γ -Komponente muss bei der Konstruktion der Tür berücksichtigt werden (Zusammensetzung, Dicke und Reihenfolge der verschiedenen Schichten). Die Energie der in dem BPE erzeugten γ -Strahlung des Neutroneneinfangs beträgt 478 keV^[2].

6.4.4 Hauptschutzwand- γ -Strahlung

In Hauptschutzwänden tritt der Neutroneneinfang im Beton auf. Wenn die Schutzwand darüber hinaus mit einer Metallschicht verstärkt ist, finden in dem Metall (Stahl, Blei) photonukleare Reaktionen mit γ -Emission statt.

Die in der Hauptschutzwand erzeugte γ -Komponente sollte für die Abschreibungsberechnungen berücksichtigt werden. Bei Betonschutzwänden könnten einige Neutronentransmissionswerte dies implizit enthalten^[2]^[30]. Für mit Metallplatten verstärkte Schutzwände sollte die zusätzliche Äquivalentdosis aufgrund der durch Metall eingefangenen γ -Strahlen bewertet werden^[2]^[31].

6.4.5 Luft- γ -Strahlung

Aktivierungsprodukte werden in der Luft durch photonukleare Reaktionen erzeugt. Aus diesem Grund sollte die Einrichtung eine ausreichende Belüftung sicherstellen, um Luftaktivierungsprodukte und Ozon abzuführen und die lokale Luftqualitätsnorm zu erfüllen.

7 Abschirmungsmaterialien und Transmissionswerte

Abschirmungsmaterialien sollten nicht nur anhand ihrer radiologischen Eigenschaften, sondern auch unter Berücksichtigung ihrer mechanischen und chemischen Eigenschaften, der Feuerbeständigkeit, der langfristigen Stabilität und der Kosten gewählt werden. Die Aktivierungseigenschaften der Materialien müssen für die Art und Energie der durch die Abschirmung zu schwächenden Materialien bekannt sein.

Die Abschirmungsmaterialien müssen vor der Errichtungsphase und vor dem Einsatz des Beschleunigers einer Qualitätskontrolle und insbesondere der Kontrolle der Homogenität (Zusammensetzung und Dichte) unterzogen werden. Der Wirkungsgrad der Abschirmung sollte während der gesamten Lebensdauer der Installation regelmäßig bewertet werden.

Für jede Schutzwand sollten die Abschirmungsmaterialien in Abhängigkeit von der Art der zu schwächenden Strahlungskomponenten gewählt werden:

- Photonenkomponenten (X und γ): Materialien, die hauptsächlich hohe oder mittlere Z-Elemente enthalten, sind wirksamer, wie etwa: Blei, Eisen, hochdichter Beton (Dichte > 3) und normaler Beton (Dichte von ungefähr 2,3);
- Neutronenkomponenten: Materialien mit einem erheblichen Anteil an leichten Elementen sind wirksamer, wie etwa hydrierte Materialien wie: Paraffin, Polyethylen und normaler Beton; borierte Materialien ermöglichen den Einfang thermischer Neutronen und sind die effizientesten Materialien (aber teuer), wie: boriertes Polyethylen (BPE), pentahydrierter Borax und Beton auf Colemanit-Basis;

für eine ausführliche Diskussion der Schutzabschirmung gegen Neutronenstrahlung siehe ISO 14152^[32], unter Berücksichtigung der Tatsache, dass das durch lineare Elektronenbeschleuniger erzeugte feldinterne Neutronenspektrum nahe an einem ²⁵²Cf-Spaltspektrum liegt^[15].

Bei einer mehrschichtigen Abschirmung mit einer oder mehreren metallischen Schichten (insbesondere Hauptschutzwand und Tür) muss die Neutronenproduktion für Nennenergien des Strahlbündels von mehr als 8 MV berücksichtigt werden; eine ausreichende Dicke des hydrierten Materials muss hinter der Metallschicht platziert werden.

Bei mehrschichtigen Abschirmungen mit neutronenabsorbierender Schicht (beispielsweise eine Tür) muss die γ -Produktion durch Neutroneneinfang berücksichtigt werden: Eine ausreichende Dicke des hohen Z-Materials muss hinter der neutronenabsorbierenden Schicht platziert werden.

Für alle Abschirmungsmaterialien und Schutzwände (Hauptschutzwand, sekundäre Schutzwand und Tür) müssen Informationen zu Photonen- und/oder Neutronenschwächungseigenschaften bekannt sein: Die für TVL-Werte verwendeten Daten müssen gemessen oder durch Monte-Carlo-Simulationen bestimmt worden und die für die TVL-Bewertung verwendeten Materialien sollten bekannt sein. Tabellen von TVL-Werten für die häufigsten Abschirmungsmaterialien für Photonenkomponenten (primäre, Streu- und Durchlassröntgenstrahlungen) sind in Anhang A enthalten. Wenn TVL-Daten von der nationalen Aufsichts- oder Genehmigungsbehörde in einem bestimmten Land vorgegeben werden, sind diese in diesem Land zu verwenden. In anderen Fällen wird für konservative Berechnungen die Verwendung des größten TVL-Werts für eine gegebene Energie und ein gegebenes Material empfohlen. Es sollte die Tatsache beachtet werden, dass die Herstellung für eine bestimmte Betonart (z. B. normaler Beton) von anderen Betonarten und insbesondere im Hinblick auf die Dichte, die elementare Zusammensetzung (ein kleiner Unterschied im Wasserstoffgehalt kann eine erhebliche Auswirkung auf die Neutronentransmission haben) und Homogenität (Verteilung der Zuschlagstoffe im Beton) erheblich abweichen kann.

Hinsichtlich der sekundären Röntgenstrahlenbündel reduziert sich die Energie der von dem Patienten gestreuten Röntgenstrahlung mit zunehmendem Streuwinkel und die Durchlassröntgenstrahlungskomponente wird im Vergleich zu der primären Röntgenstrahlung aufgeweicht, sodass die TVL-Werte der für die sekundären Schutzwände verwendeten Materialien diese Eigenschaften berücksichtigen sollten (siehe Tabellen A.5 bis A.8) [IAEA SRS 47]. Eine konservative Alternative besteht darin, primäre TVL-Werte für sekundäre, vom Patienten gestreute und Durchlassröntgenstrahlungen zu berücksichtigen.

In Anwesenheit eines Labyrinths werden die Energiespektren gestreuter Röntgenstrahlen und von Neutroneneinfang- γ -Photonen zusammen mit dem Energiespektrum gestreuter Neutronen aufgeweicht. Die Aufweichung des Energiespektrums von Strahlungen, die die Tür erreichen, muss bei der Wahl der TVL-Werte der für den Eingang des Behandlungsraums verwendeten Abschirmungsmaterialien berücksichtigt werden (siehe Tabelle A.9) [IAEA SRS 47].

Für Neutronenkomponenten muss sich der TVL auf die Schwächung der Äquivalentdosis beziehen und die in dem Abschirmungsmaterial durch Neutroneneinfang induzierte Gammakomponente berücksichtigen. Für normalen Beton und Polyethylen kann der TVL für die Behandlungsraumabschirmung und die Türabschirmung am Ende eines Labyrinths durch lineare Funktionen der direkten mittleren Neutronenenergie und der mittleren Neutronenenergie an der Tür geschätzt werden^[15] (siehe Bild A.7). Für Beton besteht ein konservativer Ansatz darin, einen TVL-Wert von 25 cm für die Behandlungsraumabschirmung in Betracht zu ziehen [IAEA SRS 47]^{[2][4][5][15]}.

Wenn unterschiedliche TVL-Werte für eine gegebene Strahlungsqualität und ein gegebenes Abschirmungsmaterial vorliegen (TVL_1 , TVL_2 , TVL_3 , TVL_e , TVL_c), kann aus Gründen der Einfachheit ein einziger Wert, TVL, verwendet werden, der der relevantere Wert je nach Dicke t der Abschirmungswand sein sollte: TVL_c entsprechend der Dicke t , sofern diese vorliegt, und wenn nicht:

— wenn $t \approx TVL_1$, dann $TVL = TVL_1$;

- wenn $t \approx TVL_1 + TVL_2$, dann $TVL = (TVL_1 + TVL_2)/2$;
- wenn $t \gg TVL_1 + TVL_2$;
- wenn $TVL_{(i+1)} > TVL_i$, dann $TVL = \max(TVL_i)$;
- wenn $TVL_{(i+1)} < TVL_i$, dann $TVL = \min(TVL_i)$.

Photonendicke- TVL -Werte [cm] für alle normalen Betonarten oder Erde mit ihrer Dichte ρ sind aus den für einen Bezugsnormalbeton ρ_{ref} erhaltenen TVL_{ref} -Daten durch Anwendung eines Dichteumkehrgesetzes zu berechnen:

$$TVL = TVL_{ref} \times \frac{\rho_{ref}}{\rho}$$

Photonen- TVL -Werte für einen gegebenen Beton mit hoher Dichte sollten spezifische erhaltene Daten für diesen Beton sein und wenn solche Daten nicht vorliegen, müssen die Dicke- TVL -Werte [cm] aus den für einen Bezugsnormalbeton mit der Dichte ρ_r erhaltenen Daten durch Anwendung des obigen Dichteumkehrgesetzes berechnet werden. Dies ist eine konservative Regel, da die tatsächlichen TVL -Werte für Beton mit hoher Dichte aufgrund der Paarproduktion in hohen Z -Komponenten bei hohen Energien geringer sind als die durch das Dichteumkehrgesetz erhaltenen Werte.

Neutronendicke- TVL -Werte [cm] sind für jeden normalen Beton mit einer Dichte ρ_i als äquivalent anzunehmen. Neutronen- TVL -Werte für einen gegebenen Beton mit hoher Dichte sollten spezifische erhaltene Daten für diesen Beton sein und wenn solche Daten nicht vorliegen, wird angenommen, dass die Dicke- TVL -Werte [cm] gleich den Werten für normalen Beton sind, da der Wasserstoffgehalt zwischen verschiedenen Betonarten nicht wesentlich variiert^[30].

Wenn der Beschleuniger bei Hauptschutzwänden enge Strahlenfelder produziert (Radius oder Halbmesser weniger als der Bereich sekundärer Elektronen) und hauptsächlich mit engen Strahlenfeldern genutzt wird, können Transmissionsdaten für breite Strahlenfelder verwendet werden. Dies ist eine konservative Regel, da enge Strahlenfelder weniger eindringen als breite Strahlenfelder, deren gestreute Komponente die Dosis hinter einer Schutzwand erhöht (Aufbaueffekt).

Für Beschleuniger mit FFF-Betriebsart bei einer gegebenen Endpunktenergie wird das Energiespektrum des primären Röntgenstrahlenbündels im Vergleich zu dem Energiespektrum in der FF-Betriebsart reduziert. Wenn der Beschleuniger ausschließlich mit der FFF-Betriebsart verwendet wird, können spezifische TVL -Werte für primäre und vom Patienten gestreute Röntgenstrahlungen berücksichtigt werden^[33]. Wenn die Betriebsarten FF und FFF beide regelmäßig genutzt werden, sollte ein konservativer Ansatz verwendet werden, der die TVL -Werte der FF-Betriebsart berücksichtigt.

8 Allgemeiner Formalismus für die Abschreibungsberechnung

Die empfohlene Strahlenschutzmenge für die Begrenzung der Belastung von Personen ist die effektive Dosis E ^[6]. Betriebliche Größenwerte wie die Äquivalentdosis H^* oder die Äquivalentdosis H_p werden von dem ICRU zur Schätzung der effektiven Dosis festgelegt^[6]. Per Konvention entspricht die Äquivalentdosis für die Zwecke dieses Dokuments einem dieser Größenwerte, der in Übereinstimmung mit dem Ziel der Abschreibungsbewertung gewählt wird.

Wenn kein Zeitraum angegeben ist, wird die für das Ziel der Abschreibungsgestaltung P (Sv) (siehe 4.1) festgelegte Äquivalentdosis während des Bezugszeitraums (Jahr, Woche, Stunde usw.) angenommen.

Für jede Strahlungskomponente (r) (siehe 6.1) ist die berechnete abgeschirmte Äquivalentdosis ($H_{tr,r}$), d. h. die übertragene Äquivalentdosis, durch die folgende Gleichung (Sv) gegeben:

$$H_{tr,r} = H_{u,r} B_r \quad (2)$$

Dabei ist

$H_{u,r}$ die nicht abgeschirmte Äquivalentdosis in Verbindung mit der Strahlung r (Äquivalentdosis ohne Schutzwand) (Sv);

B_r der Strahlungstransmissionsfaktor für die Strahlung r und die Schutzwand.

Die Dicke der Schutzwand muss so sein, dass $H_{tr,r} = P/T$:

$$B_r = P / (T \times H_{u,r}) \quad (3)$$

dabei ist T der Belegungsfaktor zur Korrektur um die Belegung des Bereichs.

T -Werte hängen von den einzelnen Ländern ab, sie sollten von den Benutzern oder durch die nationalen Vorschriften festgelegt werden. Empfohlene T -Werte sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3 — Empfohlene Werte für den Belegungsfaktor T [IAEA SRS 47, Tabelle 3]^[2]

Art des Bereichs	T
Büros, Empfangsbereiche, Laboratorien, Geschäfte, Kinderspielbereiche, Schwesternstationen, Personalräume Bedienraum	1
Stationen, Patientenräume	0,2
Untersuchungs- und Behandlungsräume für Patienten	0,5
Korridore	0,2
Toiletten, Badezimmer, Außenbereiche mit Sitzmöbeln	0,1
Treppenhäuser, unbeaufsichtigte Warteräume, Lagerräume (kein Film)	0,05

Für jede Strahlung r und jeden an den Behandlungsraum angrenzenden Bereich wird $H_{u,r}$ (Sv) unter Berücksichtigung des Richtungs- oder Nutzungsfaktors (U) berechnet:

$$H_{u,r} = W_f \times R_f \times U_f \quad (4)$$

Dabei ist

W_r die Betriebsbelastung für die Strahlung r (W oder W_L : siehe 9.3.2 und 10.3.3) (Gy);

R_r $H_{u,r}$ je Einheit von W_r (unter Berücksichtigung von $U_r = 1$) (Sv/Gy);

U_r der Richtungs- oder Nutzungsfaktor (U) für die Strahlung r.

Die Betriebsbelastung W muss darüber hinaus die nicht mit der Patientenbehandlung verbundene Nutzung des linearen Beschleunigers enthalten (z. B. Qualitätssicherung, Instandhaltung und physikalische Entwicklungsaktivitäten). Eine separate Zuordnung der Betriebsbelastung kann für Modalitäten wie stereotaktische Radiochirurgie (SRC), stereotaktische Körperstrahlentherapie (SBRT) oder Ganzkörperbestrahlung (TBI) erfolgen, wenn eine solche Nutzung geplant ist.

Die Durchlassbetriebsbelastung (W_L) entspricht der konventionellen Betriebsbelastung (W), wenn IMRT nicht verwendet wird. Die fluenzmodulierte Strahlentherapie (IMRT) erfordert eine Erhöhung der Überwachungseinheiten (MU) im Vergleich zur konventionellen Strahlentherapie. Das Verhältnis zwischen der mittleren Monitoreinheit je vorgeschriebener Einheit der Energiedosis für IMRT (MU_{IMRT}) und der Monitoreinheit je Einheit der Energiedosis für die konventionelle Behandlung (MU_{conv}) wird als IMRT-Verhältnis C_I (3.1.4) bezeichnet.

MU_{IMRT} ist die mittlere Gesamtmonitoreinheit, die erforderlich ist, um eine vorgeschriebene Einheit der Energiedosis je Fraktion für „i“ Fälle des IMRT-Bestrahlungsplans^[2] zu liefern.

MU_{conv} ist die erforderliche Monitoreinheit zur Lieferung der gleichen Einheit der Energiedosis an ein Phantom in der Bezugstiefe von 100 cm Quellabstand zum Isozentrum bei Verwendung einer Feldgröße von 10 cm × 10 cm.

Werte von C_I können von 2 bis 10 reichen und müssen von dem beteiligten Arzt im Strahlentherapiezentrum festgelegt werden. 2,5 kann als ein üblicher Wert für C_I angesehen werden.

Der IMRT-Faktor ist gegeben durch:

$$\text{IMRT factor} = C_I \times F_{\text{IMRT}} + (1 - F_{\text{IMRT}}) \quad (5)$$

Dabei ist F_{IMRT} die Fraktion der Behandlungen mit dem IMRT-Verfahren.

Die Durchlassbetriebsbelastung (W_L) ist dann gegeben durch:

$$W_L = W \times \text{IMRT factor} \quad (6)$$

Für die Hauptschutzwand muss der Strahlenschutzverantwortliche oder der qualifizierte Experte U bewerten und festlegen. Internationale Empfehlungen (IAEA, NCRP) schlagen 0,25 für die statische oder dynamische Betriebsart eines isozentrischen Beschleunigers und 0,05 für einen robotergestützten Beschleuniger vor. Für Durchlass- und Streustrahlungskomponenten (Durchlass- und Streuröntgenstrahlung, Neutronen, Neutroneneinfang im Labyrinth und an der Tür γ) sollte ein Richtungs- oder Nutzungsfaktor $U = 1$ berücksichtigt werden.

Im Fall einer Schutzwand aus einem einzigen Material kann die Dicke (t) anhand von Zehntelwertebenen auf der Grundlage der Energie des Beschleunigers, der berücksichtigten Strahlungskomponente und des Typs des Abschirmungsmaterials (siehe Tabelle A.1 bis A.9) unter Verwendung des Verhältnisses $B_r = 10^{-t/TVL}$ bestimmt werden.

Die erforderliche Anzahl (n) an TVL ist gegeben durch:

$$n = -\log(B_r) \quad (7)$$

und die Dicke der Schutzwand (t) in Metern ist gegeben durch:

$$t = n \times TVL \text{ (TVL in Metern)} \quad (8)$$

Wenn das gewählte Abschirmungsmaterial Beton ist, sollte eine geeignete Spanne berücksichtigt werden, beispielsweise durch Hinzufügung eines 0,3 TVL (entsprechend einer Halbwertschicht), da die Betondichte geringer sein kann als erwartet. Dies gilt insbesondere für Ortbeton.

Die Gesamtstrahlungsbelastung für einzelne Personen durch mehrere Quellen ist bei allen Berechnungen zu berücksichtigen, um sicherzustellen, dass die Gesamtbelastung einzelner Personen unter dem anzuwendenden Grenzwert liegt. Mehrere Quellen können mehrere Strahlungskomponenten für eine gegebene Nennenergie des Strahlbündels, mehrere Nennenergien für einen gegebenen Beschleuniger und mehrere Beschleuniger oder andere Strahlungsquellen sein. Die Dicke einer gegebenen Schutzwand muss so sein, dass die Gesamtsumme der abgeschirmten Äquivalentdosen ($H_{tr,r}$) aufgrund der verschiedenen Quellen nicht mehr als P/T beträgt.

9 Abschreibungsberechnungen für konventionelle Geräte

9.1 Allgemeines

In der konventionellen Strahlentherapie wird der lineare Beschleuniger an einem Tragarm montiert und das Strahlbündel kann in jede Richtung auf einer vertikalen Rotationsebene zeigen. Eine Hauptschutzwand dient als Abschirmung, die die Strahlung dieses Strahlbündels reduziert. Der lineare Beschleuniger erzeugt darüber hinaus Sekundärstrahlung (Durchlass- und Streustrahlung) in alle Richtungen. Eine sekundäre Schutzwand dient als Abschirmung, die diese Sekundärstrahlung reduziert. Bei einigen linearen Beschleunigern kann die Maschine einen Beam-Stopper beinhalten, der die Primärstrahlung auf eine mit der Sekundärstrahlung vergleichbare Dosisleistung reduziert. In diesem Fall muss der Beam-Stopper in die Berechnungen für die Hauptbarriere eingeschlossen werden.

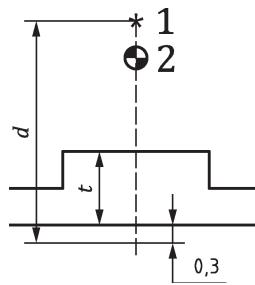
9.2 Hauptschutzwände

9.2.1 Strahlungskomponenten

Die für die Bewertung der Hauptabschirmung zu berücksichtigenden Strahlungskomponenten sind das primäre Röntgenstrahlenbündel und, für Nennenergien des Strahls > 8 MV, die direkte Neutronenstrahlung und die Neutronenstrahlung an der Hauptschutzwand. Direkte Neutronen im Strahlbündel haben jedoch eine weitaus geringere Stärke als die Photonen. Darüber hinaus ist der Neutronen-TVL im Strahlenbündel in Beton geringer als der primäre Photonen-TVL, sodass Neutronen im Strahlenbündel hinter einer Hauptschutzwand, die kein Metall enthält, vernachlässigbar klein sind. Für Hauptschutzwände, die Metall bei Nennenergien des Strahlbündels von mehr als 8 MV enthalten, kann die Photoneutronenerzeugung signifikant sein und muss bewertet werden. Da die Neutronenkomponente im Strahlbündel weit unter der durch die Schutzwand erzeugten Photoneutronenkomponente liegt, ist eine Abbildung der Neutronen im Strahlbündel in den Abschreibungsberechnungen nicht erforderlich.

Die Berechnungen der Hauptschutzwand mit normalem Einfallswinkel nutzen die in Bild 2 dargestellte Geometrie. Wenn der Strahlungseinfall schräg ist, sollten die Berechnungen unter Berücksichtigung eines normalen Einfallswinkels erfolgen: Dies ist eine einfache und konservative Annahme.

Maße in Meter



Legende

- 1 Ziel
- 2 Isozentrum

Bild 2 — Abstände der Hauptschutzwand

9.2.2 Schutzwand mit einem einzigen Material

Die unabgeschirmte Röntgenstrahlen-Äquivalentdosis ($H_{u,p}$) (Sv) ist durch Gleichung (9) gegeben.

$$H_{u,p} = \frac{W \times U}{d^2} \quad (9)$$

Dabei ist

W die für den Bezugszeitraum festgelegte Betriebsbelastung (Gy);

U der Richtungs- oder Nutzfaktor;

d der Abstand zwischen dem Ziel und dem geschützten Punkt in Metern einschließlich 0,3 m Abstand zwischen der äußeren Oberfläche der Schutzwand und dem Belegungspunkt.

Die abgeschirmte Röntgenstrahlen-Äquivalentdosis ($H_{tr,p}$) (Sv) ist durch Gleichung (10) gegeben.

$$H_{tr,p} = H_{u,p} \times B_p \quad (10)$$

Dabei ist

B_p der Röntgenstrahlentransmissionsfaktor für die Schutzwand.

9.2.3 Schutzwand mit mehreren Schichten

Der Transmissionsfaktor wird separat für jede Materialschicht in der Schutzwand berechnet. B_p wird durch Multiplikation des Transmissionsfaktors für diese Schichten gemeinsam berechnet. Der Transmissionsfaktor für die Schicht i ist gegeben durch:

$$B_i = 10^{-t_i/TVL_i} \quad (11)$$

dabei sind TVL_i und t_i der TVL und die Dicke der Schicht i (m).

Wenn Metall in einer Hauptschutzwand bei Energien des Strahlbündels über 8 MV verwendet wird, tragen die in dem Metall erzeugten Photoneutronen zu der abgeschirmten Gesamtdosis bei. Die Positionierung des Metalls innerhalb der Schutzwand ist wichtig und muss eine ausreichende Tiefe zur äußeren Oberfläche haben, sodass die Neutronendosis und die Photoneutronendosis durch das Material außerhalb des Metalls

geschwächt werden und die Gesamtdosis einschließlich des geschwächten Röntgenstrahls auf der Außenseite akzeptabel ist.

Die Neutronen-Äquivalentdosis ($H_{tr,n}$) (Sv) an einem Punkt 0,3 m hinter einer Hauptschutzwand kann anhand des einfachen analytischen Ausdrucks in Gleichung (12)^{[2][19]} geschätzt werden.

$$H_{tr,n} = \frac{W \times U \times R \times F_{\max}}{\frac{t_m}{2} t_2 + 0,3} 10^{-t_1/TVL_x} 10^{-t_2/TVL_n} \quad (12)$$

Dabei ist

- W die für den Bezugszeitraum festgelegte Betriebsbelastung (Gy);
- U der Richtungs- oder Nutzfaktor;
- t_1 und t_2 die Dicke der Innen- und Außenschicht in Metern;
- t_m die Metalldicke in Metern;
- R die Neutronenproduktionskonstante; (Sv neutron je Gy X-ray Strahlenbündelbereich, in $\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), Für ein Röntgenstrahlenbündel mit 18 MV können die folgenden berichteten Werte für R verwendet werden: 19×10^{-4} und $1,7 \times 10^{-4} \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ für Blei und Stahl; für ein Röntgenstrahlenbündel mit 15 MV wird ein R -Wert von $3,5 \times 10^{-4} \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ für Blei angegeben^[27];
- $F_{\max}$ der maximale Feldbereich im Isozentrum (m^2);
- $TVL_x(\text{m})$ der TVL des primären Röntgenstrahls für das Material vor dem Metall (siehe Tabellen A.1 und A.2);
- $TVL_n(\text{m})$ der Photoneutronen- TVL für das Material hinter dem Metall (siehe Bild A.7).

Wenn die Schutzwand mehr als eine Metallschicht enthält, wird der Beitrag separat für jede Schicht berechnet und der Neutronenbeitrag jeder Metallschicht addiert.

Die in dem neutronenschwächenden Material außerhalb des Metalls erzeugte Neutroneneinfang-Gammastrahlung muss ebenfalls bewertet werden. Eine konservative Schätzung der Gammakomponente beträgt ungefähr $2 \times H_{tr,p}$ für Stahl- und Betonlamine bei Photonenstrahlbündelenergien von 15 MV und 18 MV^{[2][31]}.

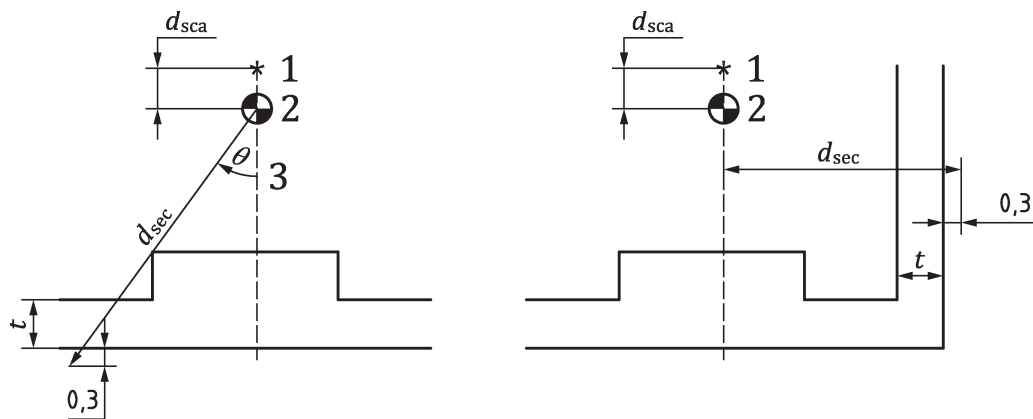
Gleichung (12) ist eine empirische Formel auf der Grundlage von Messungen an verschiedenen Installationen und mit nicht unwesentlichen Unsicherheiten verbunden. Ein weiteres Verfahren für die Bewertung der Abschirmung einer geschichteten Barriere besteht in der Monte-Carlo-Simulation unter Verwendung des in der wissenschaftlichen Literatur veröffentlichten Quellenergiespektrums für primäre Röntgenstrahlen, der möglichst genauen Dichte und elementaren Zusammensetzung (Gewichts- oder Atomfraktion) der Barriere und eines geeigneten Transportcodes (Steuerung des Transports von Photonen, Elektronen, Positronen und Neutronen, Photoneutronen-Produktion und Neutroneneinfang-Gammaerzeugung, in jedem geeigneten Energiebereich und für die elementare Zusammensetzung der verschiedenen Schichten der Barriere). Es sollte die Tatsache beachtet werden, dass die Herstellung für eine bestimmte Betonart (z. B. normaler Beton) erheblich von anderen Betonarten und insbesondere im Hinblick auf die Dichte, die elementare Zusammensetzung (ein kleiner Unterschied im Wasserstoffgehalt kann eine erhebliche Auswirkung auf die Neutronentransmission haben) und Homogenität (Verteilung der Zuschlagstoffe im Beton) erheblich abweichen kann.

9.3 Sekundäre Schutzwände

9.3.1 Strahlungskomponenten

Die sekundäre Strahlung stammt aus zwei Quellen: Durchlassstrahlung (l) aus der Abschirmung um das Ziel und Streustrahlung (s) aus dem Patienten und einer Hauptschutzwand. Die Steuerung aus der Hauptschutzwand darf nicht eingebunden werden, da sie für sekundäre Schutzwände nicht signifikant ist. Bei Beschleunigern > 8 MV ist die Röntgen- und Neutronendurchlassstrahlung zu berücksichtigen. Die unabgeschirmte Dosisleistung der sekundären Schutzwand für seitliche sekundäre Schutzwände wird anhand der Geometrie in Bild 3 berechnet.

Maße in Meter



Legende

- 1 Ziel
- 2 Isozentrum
- 3 Streuwinkel

Bild 3 — Abstände sekundärer Schutzwände

9.3.2 Schutzwand mit einem einzigen Material

9.3.2.1 Durchlassstrahlung

Die unabgeschirmte Äquivalentdosis der Röntgendurchlassstrahlung aufgrund von Leckage des Beschleunigerkopfs ($H_{u,L}$) (Sv) ist durch Gleichung (13) gegeben.

$$H_{u,L} = \frac{W_L \times U \times 10^{-3}}{d_{sec}^2} \quad (13)$$

Dabei ist

W_L die Betriebsbelastung der Durchlassstrahlung für den Bezugszeitraum (Gy);

U der als 1 für die Durchlassstrahlung angenommene Richtungs- oder Nutzfaktor;

d_{sec} der Abstand zwischen dem Isozentrum (gemittelte Position des Targets) und der geschützten Stelle in Metern.

10^{-3} die Durchlassfraktion des Röntgenstrahls.

Der 10^{-3} -Wert gibt die Anforderung der Norm IEC 60601-2-1 wieder, die vorschreibt, dass die mittlere Röntgendurchlassstrahlung weniger als 0,1 % der Dosis im Isozentrum in einem Abstand von 1 m zur Quelle der Durchlassstrahlung sein muss^[1], und ist darüber hinaus eine konservative Annahme für die FFF-Betriebsart, da die Entfernung des Ausgleichsfilters die Durchlassstrahlung des Kopfs reduziert, indem sie die integralen Target-Stromanforderungen für die gleiche gelieferte Dosis reduziert^[33].

Die abgeschirmte Röntgendurchlassstrahlen-Äquivalentdosis ($H_{tr,L}$) (Sv) ist durch Gleichung (14) gegeben.

$$H_{tr,L} = H_{u,L} \times B_L \quad (14)$$

Dabei ist B_L der Durchlasstransmissionsfaktor, berechnet aus der Röntgendurchlassstrahlung TVL (siehe Tabelle A.5).

Für Nennenergien des Strahls von mehr als 8 MV ist die Neutronendurchlassstrahlung in der berechneten sekundären abgeschirmten Dosisleistung enthalten. Die Neutronendurchlassstrahlung wird mit demselben Ansatz für die Röntgendurchlassstrahlung berechnet [Gleichungen (13) und (14)], jedoch mit einer anderen Neutronendurchlassfraktion und anderen TVL (siehe Bild A.7). Die Neutronendurchlassfraktion hängt von der Endpunktennergie des primären Röntgenstrahls und dem Beschleunigermodell ab [IAEA SRS 47, Tabelle 10]. Für die FFF-Betriebsart besteht eine konservative Annahme darin, die gleiche Neutronendurchlassfraktion wie für die FF-Betriebsart zu berücksichtigen, da die Entfernung des Ausgleichsfilters die Durchlassstrahlung des Kopfs durch die Reduzierung der integralen Target-Stromanforderungen für dieselbe gelieferte Dosis reduziert^[33].

9.3.2.2 Patientenstreuung

Die unabgeschirmte Patientenstreuungs-Äquivalentdosis ($H_{u,PS}$) (Sv) ist durch Gleichung (15) gegeben.

$$H_{u,PS} = \frac{\alpha(\theta) \times W \times U \times (F_{max}/0,04)}{d_{sca}^2 \times d_{sec}^2} \quad (15)$$

Dabei ist

d_{sca} der Abstand zwischen Target und Isozentrum in Metern;

d_{sec} der sekundäre Abstand zwischen dem Isozentrum und dem geschützten Punkt in Metern;

$\alpha(\theta)$ die Patientenstreufraktion relativ zur Hauptschutzwand in einem Abstand von 1 m für eine Feldgröße von $0,04 \text{ m}^2$ für den Streuwinkel θ in einer Tiefe von 15 mm für die Energien 6 MV und 25 mm für höhere Energien (siehe Tabelle B.1). Für Beschleuniger mit FFF-Betriebsart sind spezifische $\alpha(\theta)$ -Werte zu berücksichtigen^[33];

F_{max} der maximale Feldbereich im Isozentrum in m^2 ;

U ist der für alle Wände als 1 angenommene Richtungs- oder Nutzfaktor.

Die abgeschirmte Patientenstreuungs-Äquivalentdosis (H_{PS}) (Sv) ist durch Gleichung (16) gegeben.

$$H_{tr,PS} = H_{u,PS} \times B_{PS} \quad (16)$$

Dabei ist B_{PS} die aus dem Patientenstreuungs- TVL (siehe Tabellen A.6 bis A.8) berechnete Patientenstreuungstransmission.

9.3.3 Schutzwand mit mehreren Schichten

Bei mehreren Schichten Abschirmungsmaterial wird die Transmission einzeln für jede Schicht berechnet und die Gesamttransmission ist das Produkt der Transmissionen jeder einzelnen Schicht. Die Reihenfolge des Materials kann wichtig sein, wenn die Schutzwand aus Metall und hydriertem Material wie etwa Blei und Polyethylen besteht. Neutroneneinfang-Gammas im Polyethylen werden nicht explizit für die Sekundärstrahlung modelliert. Dies impliziert, dass eine Polyethylenschicht nicht die Außenseite der Abschirmung in einer sekundären Schutzwand bilden sollte. In einer sekundären Schutzwand, die Blei und Polyethylen enthält, sollte das Polyethylen zwischen zwei ungefähr gleich dicken Bleischichten eingefügt werden. Die äußere Bleischicht bietet eine angemessene Abschirmung zur Schwächung der Einfanggammastrahlen. Die innere Bleischicht ist ineffektiv für den Neutroneneinfang, reduziert aber die Neutronenenergie und erhöht so die Wirkung des Polyethylens.

10 Türen und Labyrinthen

10.1 Allgemeines

Die erforderliche Abschirmung am Eingang zu einem Behandlungsraum mit einem linearen Beschleuniger kann durch Einfügen eines Labyrinths in die Raumgestaltung reduziert oder eliminiert werden. Ein Labyrinth mit einem einzelnen Knick verhindert, dass direkte Strahlung den Eingang erreicht. Die Größenordnung und Energie der Streustrahlung reduziert sich mit zunehmender Labyrinthlänge. Zusätzliche Knicke in dem Labyrinth reduzieren die Strahlung, die den Eingang erreicht zusätzlich. Üblicherweise sind mindestens drei Knicke erforderlich, um auf eine Tür am Eingang zu verzichten.

Eine übliche Tür enthält Blei sowie bei linearen Beschleunigerenergien über 8 MV Paraffin oder boriertes Polyethylen. Eine relativ geringe Bleidicke eliminiert Röntgenstreustrahlung bereits effektiv. Größere Bleidicken sind erforderlich, um Gammastrahlen in Verbindung mit der Neutronenproduktion einzufangen. Wenn eine Tür Paraffin oder boriertes Polyethylen enthält, muss mindestens eine Hälfte des Bleis auf der Außenseite des Raums liegen, um Einfang-Gammas in Verbindung mit dem Neutroneneinfang in der Tür zu mindern.

Ein Labyrinth mit einer einzelnen Strecke ist ein Labyrinth mit einem einzelnen Knick (siehe Bilder 4 bis 9). Übliche Abmessungen enthalten eine 5 m lange innere Labyrinthwand, eine Labyrinthbreite von 2 m bis 2,5 m und eine Eingangsinnenbreite von 2 m bis 3 m. Die Labyrinthhöhe beträgt üblicherweise 3 m und in einigen Fällen wird ein Sturz verwendet, um die effektive innere Eingangshöhe des Labyrinths zu reduzieren.

Für ein Labyrinth mit einer einzelnen Strecke prognostizieren die nachfolgenden Berechnungen die unabgeschirmte Dosisleistung am Labyrintheingang innerhalb eines Faktors von ungefähr zwei (Unterschätzung oder Überschätzung). Diese Berechnungen können für Labyrinthkonfigurationen mit mehr als einem einzelnen Knick (z. B. siehe Bilder 10 und 11 für ein Labyrinth mit zwei Strecken) und für Konfigurationen ohne Labyrinth oder ohne Tür (siehe 10.5 und 10.6) angepasst werden. Die Monte-Carlo-Simulation kann als alternatives Verfahren angewendet werden.

Wenn Monte-Carlo-Simulationen verwendet werden, müssen diese unter Anwendung der korrekten Geometrie (Behandlungsraum, Labyrinth und Eingang des Behandlungsraums), der in der wissenschaftlichen Literatur veröffentlichten primären Röntgenstrahlen- und Neutronenenergiespektren, der möglichst genauen Dichte und elementaren Zusammensetzung aller Schutzwände und eines geeigneten Transportcodes (Steuerung des Transports von Photonen, Elektronen, Positronen und Neutronen, Photoneutronen-Produktion und Neutroneneinfang-Gammaerzeugung, in jedem geeigneten Energiebereich und für die elementare Zusammensetzung der verschiedenen Barrieren) ausgeführt werden. Es sollte die Tatsache beachtet werden, dass die Herstellung für eine bestimmte Betonart (z. B. normaler Beton) erheblich von anderen Betonarten abweichen kann, wie zuvor in 9.2.3 erwähnt.

10.2 Strahlungskomponenten

Die Labyrinthberechnung beinhaltet: Wandstreustrahlung, Patientenstreustrahlung und Durchlassstreustrahlung. Die Wandstreuung ist die Strahlung des primären Strahlenbündels, die von der Hauptschutzwand und anschließend von der Wand am Ende des Labyrinths reflektiert wird. Die Patientenstreuung ist die von dem behandelten Patienten gestreute Strahlung, die anschließend von der Wand am Ende des Labyrinths reflektiert wird. Die Durchlassstreustrahlung ist die Röntgendurchlassstrahlung, die von der Wand am Ende des Labyrinths reflektiert wird.

Zusätzlich den drei vorgenannten Arten von Streustrahlungen muss die berechnete Dosis am Eingang des Labyrinths auch eine konventionelle sekundäre direkte Durchlassstrahlung durch die innere Labyrinthwand berücksichtigen. In Situationen, in denen der Eingang hinter der Hauptschutzwand liegt, empfiehlt sich eine Berechnung der Hauptschutzwand anstelle einer direkten Durchlassstrahlungsberechnung.

Für Nennenergien des Strahlbündels von mehr als 8 MV wird die abgeschirmte Äquivalentdosis in Verbindung mit den Neutronen zu der Dosis aus den vier vorgenannten Strahlungskomponenten bei der Berechnung der gesamten abgeschirmten Äquivalentdosis addiert. Dies umfasst nicht nur die Neutronen-Äquivalentdosis, sondern auch die Einfang-Gammadosis in Verbindung mit dem Neutroneneinfang in dem Labyrinth.

10.3 Standardlabyrinth

10.3.1 Berechnungen der Röntgenstreustrahlung in Labyrinth

10.3.1.1 Allgemeines

Die Rotationsebene des Beschleunigertragarms verläuft normalerweise parallel zur inneren Labyrinthwand. Die Wandstreustrahlung wird anders berechnet, wenn die Rotationsebene senkrecht zur inneren Labyrinthwand verläuft. Die Verteilung der Patientenstreustrahlung und die Berechnungen der Durchlassstreustrahlung sind nicht von der Ausrichtung der Rotationsebene abhängig.

Nachdem jede einzelne Komponente der Röntgenstreustrahlung berechnet wurde, wird die gesamte unabgeschirmte Äquivalentdosis ($H_{u,XS}$) (Sv) an der Labyrinthtür durch Summierung der vorgenannten Äquivalentdosiskomponenten bestimmt.

$$H_{u,XS} = H_{u,ps} \times H_{u,S} + H_{u,LS}$$

Dabei ist

$H_{u,ps}$ die unabgeschirmte Äquivalentdosis für den Bezugszeitraum (Sv) an der Labyrinthtür aufgrund der Patientenstreustrahlung;

$H_{u,S}$ die unabgeschirmte Äquivalentdosis für den Bezugszeitraum (Sv) an der Labyrinthtür aufgrund der Streuung des primären Strahlbündels von der Hauptschutzwand;

$H_{u,LS}$ die unabgeschirmte Äquivalentdosis für den Bezugszeitraum (Sv) an der Labyrinthtür aufgrund der einzelnen gestreuten Kopfdurchlassstrahlung.

Bei der Berechnung der Wandstreustrahlung sollte die Schwächung des primären Strahlbündels im Patienten nicht berücksichtigt werden (konservative Annahme). Für die Berechnungen der Patienten- und Wandstreustrahlung sollte die extremste Geometrie mit einem Faktor (U) gleich 1 (konservative Annahme) verwendet werden. Durchlassstreustrahlung kann mit einem Faktor (U) gleich 1 unter Verwendung der mittleren Target-Position (Isozentrum) berechnet werden.

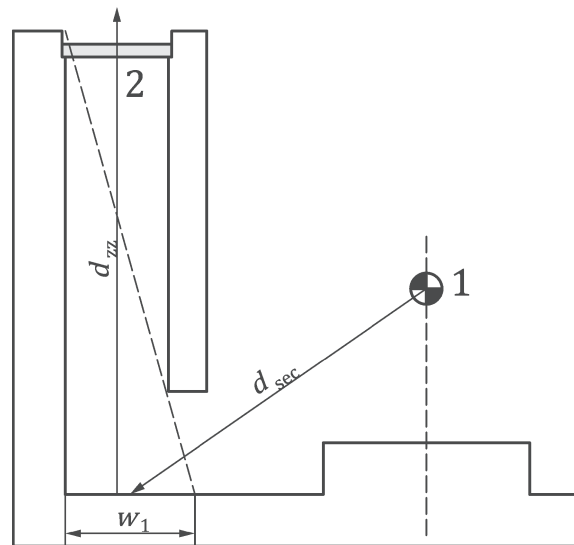
10.3.1.2 Patientenstreustrahlung

Die unabgeschirmte Äquivalentdosis durch Patientenstreustrahlung ($H_{u,PS}$) (Sv) ist durch Gleichung (17) gegeben. Siehe Bild 4.

$$H_{u,PS} = \frac{\alpha(\theta) \times W \times U \times (F_{\max}/0,04) \times \alpha_1 \times A_1}{d_{sca}^2 \times d_{sec}^2 \times d_{zz}^2} \quad (17)$$

Dabei ist

- d_{sca} der Abstand zwischen Target und Isozentrum in Metern;
- d_{sec} der Abstand zwischen dem Isozentrum und der Wand am Ende des Labyrinths in Metern;
- d_{zz} die Länge des Labyrinths von der Wand zum Eingang in Metern;
- W die Betriebsbelastung für den Bezugszeitraum in Gray;
- U der Richtungs- oder Nutzfaktor;
- $\alpha(\theta)$ die Patientenstreustrahlungsfraction (siehe 9.3.2), geglättet für $(0,2 \times 0,2)$ m² Feldgröße;
- $F_{\max}$ der maximale Feldbereich in m² (derselbe Bereich wird für die Patientenstreustrahlung in der sekundären Berechnung angewendet);
- α_1 der Reflexionskoeffizient in m⁻² in Abhängigkeit von der Energie der Patientenstreustrahlung, dem Wandmaterial, den Einfall- und Reflexionswinkeln (siehe Tabellen B.2 und B.3); ein konservativer Wert von 0,5 MeV kann für die mittlere Energie der Patientenstreustrahlung berücksichtigt werden;
- A_1 die Fläche der Rückwand eines Labyrinths in m², die von dem äußeren Labyrintheingang aus sichtbar ist, $A_1 = w_1 \times h$, dabei ist w_1 die Breite der Fläche in Metern und h die Raumhöhe in Metern.



Legende

- 1 Isozentrum
- 2 Tür

Bild 4 — Strecken der Patientenstreustrahlung

10.3.1.3 Wandstreustrahlung

10.3.1.3.1 Wandstreustrahlung mit der Rotationsebene parallel zur inneren Labyrinthwand

Für diese Geometrie wird die unabgeschirmte Äquivalentdosis am Eingang durch die Wandstreustrahlung anhand der Geometrie in Bild 5 berechnet. Die unabgeschirmte Äquivalentdosis durch Wandstreustrahlung ($H_{u,S}$) (Sv) ist durch Gleichung (18) gegeben.

$$H_{u,S} = \frac{W \times U \times \alpha_0 \times A_0 \times \alpha_2 \times A_2}{d_h^2 \times d_r^2 \times d_z^2} \quad (18)$$

Dabei ist

d_h der Abstand zwischen Target und Hauptschutzwand in Metern;

d_r der Abstand zwischen Hauptschutzwand und innerem Labyrintheingang in Metern;

d_z der Abstand zwischen dem inneren Labyrintheingang und dem Eingang in Metern;

W die Betriebsbelastung für den Bezugszeitraum in Gray;

U der Richtungs- oder Nutzfaktor;

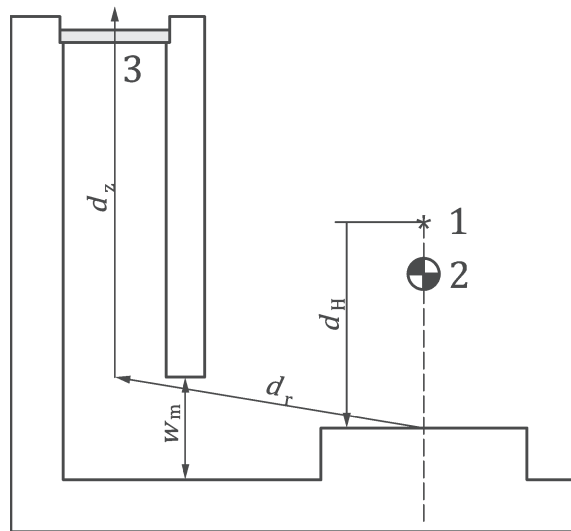
α_0 der Reflexionskoeffizient in m^{-2} in Abhängigkeit von der Nennenergie des Röntgenstrahlenbündels, dem Wandmaterial der Hauptschutzwand und den Einfall- und Reflexionswinkeln (siehe Tabellen B.2 und B.3) für Beschleuniger mit FFF-Betriebsart, spezifische Werte für α_0 sind zu berücksichtigen^[33];

A_0 die Strahlbündelfläche in m^2 an der ersten Reflexionswand für die maximale Feldgröße;
 $A_0 = (0,4 d_h)^2$ für ein Feld von $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ in einem Abstand von 1 m;

α_z der Reflexionskoeffizient in m^{-2} in Abhängigkeit von der Streuenergie der Hauptwand, dem Wandmaterial des Labyrinths und den Einfall- und Reflexionswinkeln (siehe Tabellen B.2 und B.3); ein Wert von 0,5 MeV wird üblicherweise für die Energie der Hauptwandstreustrahlung angenommen, ein Wert von 0,25 MeV ist jedoch konservativer;

A_z die Querschnittsfläche des inneren Labyrintheingangs in m^2 , $A_z = w_m \times h$, dabei ist w_m die Breite des inneren Labyrintheingangs in Metern und h die Höhe des Raums in Metern.

Die Fraktion des durch den Patienten übertragenen primären Strahlenbündels wird nicht berücksichtigt.



Legende

- 1 Ziel
- 2 Isozentrum
- 3 Tür

Bild 5 — Strecke der Wandstreustrahlung bei parallel zur inneren Labyrinthwand verlaufender Rotationsebene

10.3.1.3.2 Wandstreustrahlung mit der Rotationsebene senkrecht zur inneren Labyrinthwand

Wenn die Rotationsebene senkrecht zur inneren Labyrinthwand verläuft, wird die unabgeschirmte Äquivalentdosis am Eingang durch Wandstreustrahlung anhand der Geometrie in Bild 6 berechnet. Die unabgeschirmte Äquivalentdosis durch Wandstreustrahlung ($H_{u,S}$) (Sv) ist durch Gleichung (19) gegeben.

$$H_{u,S} = B \frac{W \times U \times \alpha_0 \times A_0}{d_H^2 \times d_z^2} \quad (19)$$

Dabei ist

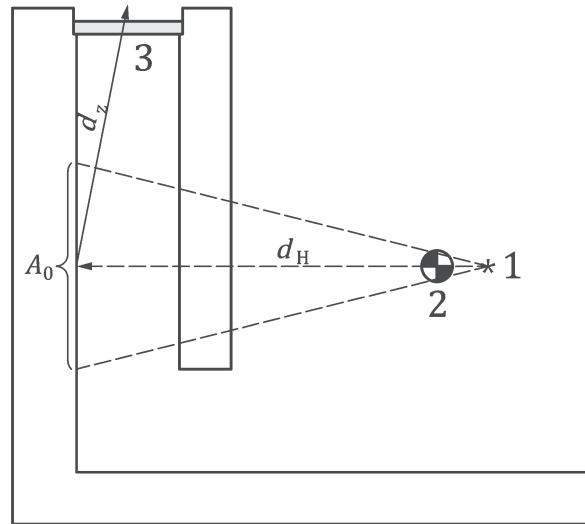
d_H der Abstand zwischen Target und Hauptschutzwand des Labyrinths in Metern;

d_z der Abstand zwischen Wand und Eingang in Metern;

W die Betriebsbelastung für den Bezugszeitraum in Gray;

U der Richtungs- oder Nutzfaktor;

- B der Transmissionsfaktor der Labyrinthwand bei Verwendung des primären TVL (siehe Anhang A);
- α_0 der Reflexionskoeffizient in m^{-2} in Abhängigkeit von der Nennenergie des Röntgenstrahlenbündels, dem Wandmaterial der Hauptschutzwand des Labyrinths und den Einfall- und Reflexionswinkeln (siehe Tabellen B.2 und B.3) für Beschleuniger mit FFF-Betriebsart, spezifische Werte für α_0 sind zu berücksichtigen^[33];
- A_0 die Strahlenbündelfläche in m^2 an der Reflexionswand für die maximale Feldgröße; $A_0 = (0,4 d_H)^2$ für ein Feld mit einer Größe von $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ in einem Abstand von 1 m.



Legende

- 1 Ziel
- 2 Isozentrum
- 3 Tür

Bild 6 — Strecke der Wandstreustrahlung bei senkrecht zur inneren Labyrinthwand verlaufender Rotationsebene

10.3.1.4 Durchlassstreustrahlung

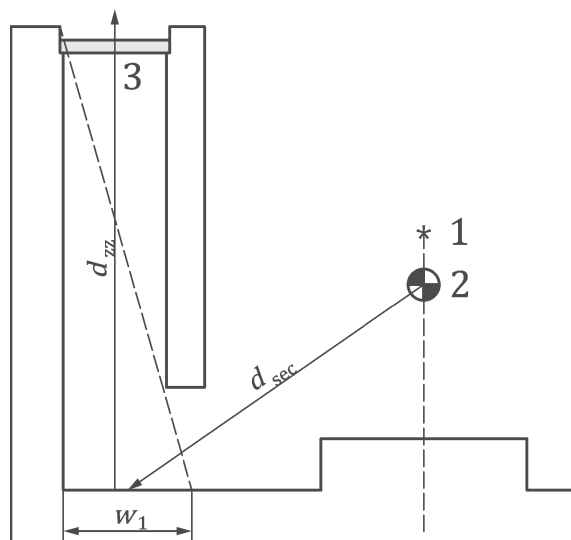
Die unabgeschirmte Äquivalentdosis am Eingang durch die Durchlassstreustrahlung wird anhand der Geometrie in Bild 7 berechnet. Die unabgeschirmte Äquivalentdosis der Durchlassstreustrahlung ($H_{u,LS}$) (Sv) ist durch Gleichung (20) gegeben.

$$H_{u,LS} = \frac{10^{-3} \times W_L \times U \times \alpha_1 \times A_1}{d_{sec}^2 \times d_{zz}^2} \quad (20)$$

Dabei ist

- d_{sec} der Abstand zwischen der mittleren Target-Position (Isozentrum) und der Wand am Ende des Labyrinths in Metern;
- d_{zz} die Länge des Labyrinths von der Wand zum Eingang in Metern;
- W_L die Betriebsbelastung für den Bezugszeitraum in Gray;
- U der Richtungs- oder Nutzfaktor in Höhe von 1;

- α_1 der Reflexionskoeffizient in m^{-2} , in Abhängigkeit von der Energie der Durchlassröntgenstrahlung, dem Material der Rückwand des Labyrinths und den Einfall- und Reflexionswinkeln (siehe Tabellen B.2 und B.3); ein Wert von 1,5 MeV kann als mittlere Energie der Durchlassstrahlung betrachtet werden^{[8][19]}; für Beschleuniger mit FFF-Betriebsart können spezifische Werte für α_1 berücksichtigt werden^[33];
- A_1 die Fläche der Rückwand des Labyrinths in m^2 , die von dem äußeren Labyrintheingang aus zu sehen ist, $A_1 = w_1 \times h$ dabei ist w_1 die Breite der Fläche in Metern und h die Raumhöhe in Metern.
- 10^{-3} die Durchlassfraktion der Röntgenstrahlung (siehe 9.3.2).



Legende

- 1 Ziel
- 2 Isozentrum
- 3 Tür

Bild 7 — Strecken der Durchlassstreustrahlung

10.3.2 Direkte Röntgenstreustrahlung

Die unabgeschirmte Äquivalentdosis (einschließlich der Labyrinthwandtransmission, jedoch nicht der Türtransmission) am Eingang durch Streustrahlung ($H_{u,L}$) (Sv) ist durch Gleichung (21) gegeben. Siehe Bild 8.

$$H_{u,L} = \frac{W_L \times U \times 10^{-3} \times B}{d_L^2} \quad (21)$$

Dabei ist

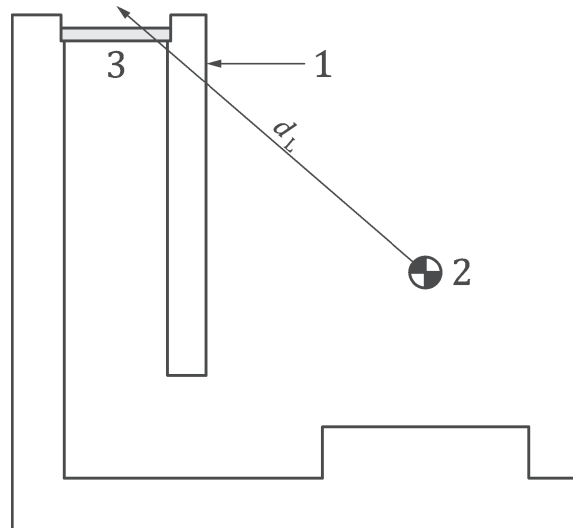
- d_L der Abstand zwischen der mittleren Target-Position (Isozentrum) und dem geschützten Punkt in Metern;
- B der Transmissionsfaktor der Labyrinthwand;
- W_L die Betriebsbelastung der Durchlassstrahlung für den Bezugszeitraum in Gray;

10^{-3} die Fraktion der Röntgendurchlassstrahlung (siehe 9.3.2);

U der Richtungs- oder Nutzfaktor in Höhe von 1.

Die Labyrinthwandtransmission wird anhand des Durchlassstrahlungs- TVL des Materials der Labyrinthwand (siehe Tabelle A.5) berechnet.

Wenn ein anderer Ort durch die Anordnung des Behandlungsraums eine wesentlich höhere unabgeschirmte Dosis hat, darf die Berechnung für diesen Ort vorgenommen werden. In diesen Fall darf eine Anpassung entsprechend des Richtungs- oder Nutzfaktors an das Target in dieser Ausrichtung vorgenommen werden.



Legende

- 1 Labyrinthwand
- 2 Isozentrum
- 3 Tür

Bild 8 — Strecke der direkten Durchlassstrahlung

10.3.3 Berechnungen der Neutronen und Einfang-Gammas im Labyrinth

Für Beschleuniger mit einer Nennenergie des Strahlbündels von mehr als 8 MV ist zu beachten, dass die Neutronendurchlassstrahlung durch die Wand und die Tür im Allgemeinen eine vernachlässigbare Komponente der abgeschirmten Äquivalentdosis am Eingang ist.

Im Gegensatz hierzu muss die Neutronentransmission im Labyrinth in die Berechnung der Äquivalentdosis am Eingang des Labyrinths eingebunden werden. Diese Äquivalentdosis muss nicht nur die Neutronen, sondern auch die Gammastrahlen in Verbindung mit dem Neutroneneinfang im Labyrinth enthalten. Eine analytische Berechnung ist nachfolgend beschrieben [IAEA SRS 47]^[34].

Der erste Schritt besteht darin, die gesamte Neutronenfluenz am Punkt A je Gy Betriebsbelastung (φ_A) (Neutronen/m²·Gy) zu berechnen. Die Berechnung erfolgt anhand Gleichung (22) und verwendet die in Bild 9 dargestellte Geometrie.

$$\varphi_A = \frac{\beta \times Q_n}{4\pi \times d_1^2} + \frac{5,4 \beta \times Q_n}{2\pi \times S_r} + \frac{1,3 Q_n}{2\pi \times S_r} \quad (22)$$

Dabei ist

β der Transmissionsfaktor der Abschirmung des Beschleunigerkopfs (1 für Blei, 0,85 für Wolfram);

Q_n die Stärke der Neutronenquelle (Neutronen je Röntgenstrahldosisseinheit im Isozentrum) (Neutronen/Gy). Q_n hängt von der Nennenergie des Strahls und dem Beschleunigermodell für eine gegebene Energie ab. Werte für Q_n sind in IAEA SRS 47, Tabelle 9, in^[2] und in^[22] für moderne Beschleuniger angegeben. Je nach Modell liegt der Wert von Q_n für einen modernen 18-MV-Beschleuniger zwischen $0,428$ und $1,26 \times 10^{12}$ bei 18 MV und zwischen $0,144$ und $0,742 \times 10^{12}$ bei 15 MV^{[2][22]};

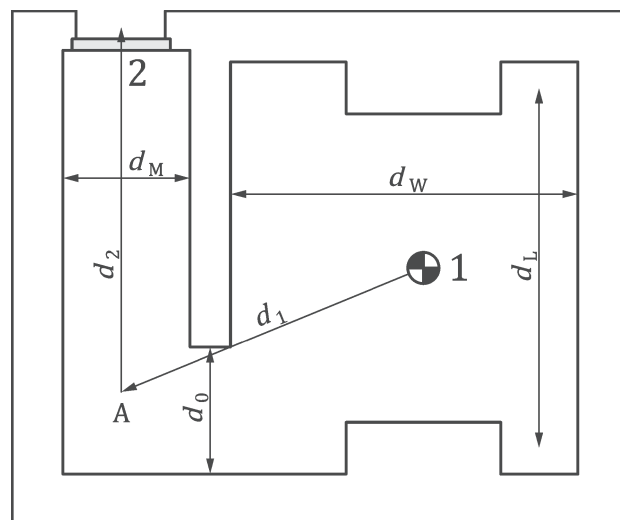
S_r die gesamte Reflexionsoberfläche des Behandlungsraums in m^2 , gegeben durch Gleichung (23):

$$S_r = 2(d_L d_W + h d_L + h d_W) \quad (23)$$

Dabei ist

h die Raumhöhe in Metern;

d_W und d_L die Breite und Länge des Behandlungsraums in Metern.



Legende

- 1 Isozentrum
- 2 Tür

Bild 9 — Neutronenstrecken des Labyrinths

Gleichung (24) gibt die unabgeschirmte Einfanggamma-Äquivalentdosis am Eingang an ($H_{u,\gamma}$) (Sv).

$$H_{u,\gamma} = W_L \times U \times K \times \phi_A \times 10^{-d_2/TVD_\gamma} \quad (24)$$

Dabei ist

d_2 der Abstand zwischen Punkt A und dem geschützten Punkt in Metern;

TVD_γ der Einfanggamma-Zehntelwertabstand (m); ein Wert von 6 m kann verwendet werden^[2];

- K das Verhältnis zwischen der Einfanggamma-Äquivalentdosis und der Neutronenfluenz am Punkt A ($\text{Sv}\cdot\text{m}^2/\text{Neutronen}$) [IAEA SRS 47]^[2]; ein Wert von $6,9 \times 10^{-16} \text{ Sv}\cdot\text{m}^2/\text{Neutronen}$ kann verwendet werden (Mittelwert aus Messungen an verschiedenen Einrichtungen)^[2];
- W_L die Betriebsbelastung der Durchlassstrahlung für den Bezugszeitraum in Gray;
- U der Richtungs- oder Nutzfaktor in Höhe von 1.

Dies ist darüber hinaus eine konservative Annahme für die FFF-Betriebsart, da die Entfernung des Ausgleichsfilters die Durchlassstrahlung des Beschleunigerkopfs durch Reduzierung der integralen Target-Stromanforderungen für dieselbe gelieferte Dosis reduziert^[33].

Gleichung (25) ergibt die unabgeschirmte Äquivalentdosis am Eingang ($H_{u,n}$) (Sv).

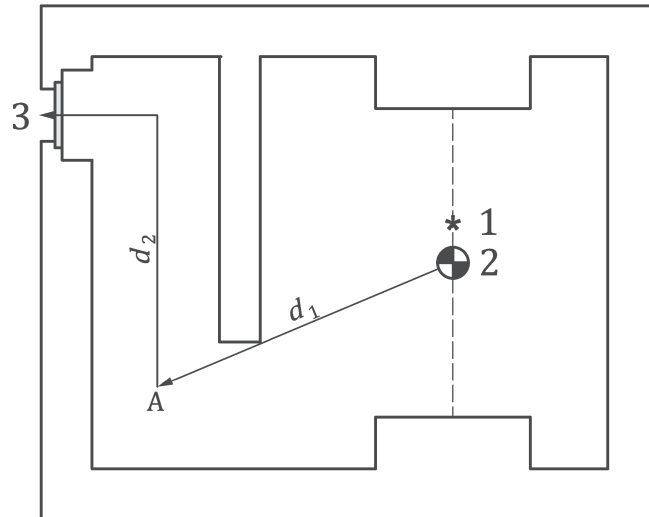
$$H_{u,n} = W_L \times U \times 2,4 \times 10^{-15} \phi_A \left(\frac{S_0}{S} \right)^{1/2} \left[1,64 \times 10^{-\left(\frac{d_2}{1,9}\right)} + 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD_n}\right)} \right] \quad (25)$$

Dabei ist

- S_0/S das Verhältnis zwischen der Querschnittsfläche des inneren Labyrintheingangs ($S_0 = d_0 \times h$), in m^2 und der Querschnittsfläche des Labyrinths ($S = d_M \times h$) in m^2 , dabei sind d_0 (in Metern) und d_M (in Metern) die Breiten des inneren Labyrintheingangs und des Labyrinths und h die Höhe des Labyrinths (in Metern);
- TVD_n der Neutronen-Zehntelwertabstand in Metern; $TVD_n = 2,06 \times S^{1/2}$ ^[2];
- W_L die Betriebsbelastung der Durchlassstrahlung für den Bezugszeitraum in Gray;
- U der Richtungs- oder Nutzfaktor in Höhe von 1.

10.4 Labyrinth mit zwei Strecken

Wenn das Labyrinth mehr als einen Knick hat, wird die endgültige Strecke in der Berechnung der Neutronen im Labyrinth entlang der Mittellinie des Labyrinths bis zum Eingang gemessen. Dies ist für die Strecke d_2 aus Bild 10 dargestellt. Darüber hinaus reduziert der zusätzliche Knick im Labyrinth grob die unabgeschirmte Äquivalentdosis um einen Faktor von drei im Vergleich zu einem einzelnen Knick und derselben Gesamtlänge [IAEA SRS 47]^[2].



Legende

- 1 Ziel
- 2 Isozentrum
- 3 Tür

Bild 10 — Neutronenberechnungsgeometrie mit zusätzlichem Knick im Labyrinth

Gestreute Röntgenstrahlung unterliegt einer zusätzlichen Wechselwirkung, wenn der Eingang des Behandlungsraums nicht vom hinteren Ende des Labyrinths aus zu erkennen ist. Ein zusätzlicher Streufaktor wird hinzugefügt, um die Wechselwirkung zu berücksichtigen. Der von dem Eingang des Behandlungsraums aus sichtbare Teil der Labyrinthwand bestimmt die zur Berechnung des zusätzlichen Faktors verwendete Fläche (A_M) (m^2), wie in Bild 11 dargestellt. Der zusätzliche Streufaktor ist gegeben durch:

$$\alpha \times A_M / d_M^2 \quad (26)$$

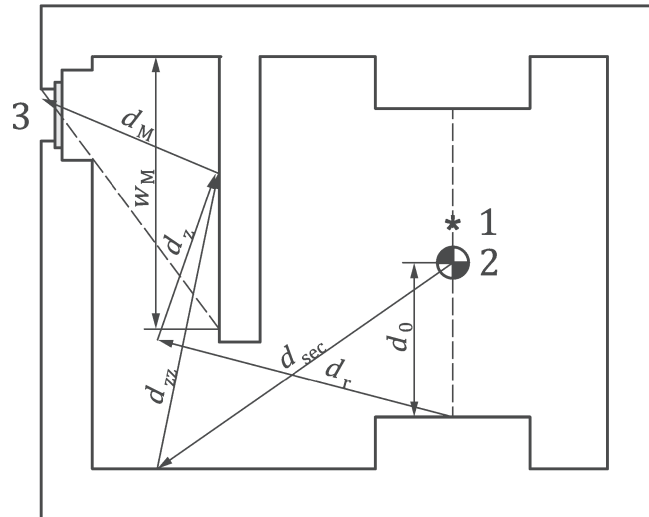
Dabei ist

α der Reflexionskoeffizient (m^{-2}) (siehe Tabelle B.2 und B.3); ein Wert von 0,5 MeV kann für die Energie der einfallenden Strahlung angenommen werden, jedoch ist ein Wert von 0,25 MeV konservativer;

d_M der Abstand zwischen der dem Eingang gegenüberliegenden Wand und dem Eingang in Metern;

A_M die Fläche in m^2 der Labyrinthwand, die vom Eingang des Behandlungsraums aus zu sehen ist, $A_M = w_M \times h$ dabei ist w_M die Breite der Fläche (in Metern) und h die Raumhöhe (in Metern).

Die Abstände d_Z und d_{ZZ} erstrecken sich zu der Wand gegenüber dem Eingang (siehe 10.3).



Legende

- 1 Ziel
- 2 Isozentrum
- 3 Tür

Bild 11 — Streustrahlungsberechnungsgeometrie mit zusätzlichem Knick im Labyrinth

Ein weiteres Berechnungsverfahren besteht darin, die Monte-Carlo-Simulation zu nutzen, um den Transport von Röntgenstrahlen-, Neutronen- und Gammakomponenten im Labyrinth und die Transmission der Strahlungen durch die Tür zu berechnen.

10.5 Kein Labyrinth - Direkt abgeschirmte Türen

10.5.1 Allgemeines

Wie in 10.3 beschrieben, enthalten Behandlungsräume für lineare Beschleuniger traditionell ein Labyrinth zwischen dem Eingang zu dem Behandlungsraum und der Maschine. Die Größe des Behandlungsraums kann erheblich reduziert werden, wenn auf dieses Labyrinth verzichtet wird, sodass der Raum durch eine in einer sekundären Schutzwand installierte direkt abgeschirmte Tür betreten wird. Eine direkt abgeschirmte Tür muss nicht nur Röntgenstrahlung, sondern auch Durchlassneutronen für primäre Nennenergien über 8 MV abschirmen. Die Tür selbst ist eine sekundäre Schutzwand, deren Abschirmung nach 9.3 berechnet wird.

Ein maximaler Abstand von etwa 10 mm zwischen Wand und Tür ist nach Einpassung in die Wandkonstruktion akzeptabel. Die Gestaltung der Tür sollte eine minimale Überlappung von 200 mm über die innere Oberfläche der Abschirmung hinaus in die Eingangswände vorsehen, siehe Bild 12. Die begrenzte Überlappung der Tür mit dem Eingang zum Beschleunigerraum kann eine zusätzliche spezielle Abschirmung erfordern. 10.5.2 beschreibt die Abschirmung auf der abgewandten Seite der Tür, die als sekundäre Schutzwand mit einer speziellen Geometrie berechnet wird. 10.5.3 beschreibt ein Verfahren zur Anpassung der Labyrinthberechnungen zur Beurteilung der erforderlichen Abschirmung auf der dem Eingang zugewandten Seite.

10.5.2 Abschirmung auf der abgewandten Seite eines direkt abgeschirmten Türeingangs

Wie in Bild 12 dargestellt, entsteht ein direkter Durchlassstrahlungspfad an der abgewandten seitlichen Kante der Tür. Um die relativ kurze schräge Dicke durch die Ecke des Eingangs auszugleichen, wird üblicherweise zusätzliches Material hinter der Tür und in der Eingangswand hinzugefügt, wie in Bild 13 gezeigt. Wenn ausreichend Platz vorhanden ist, kann Beton mit Normalgewicht auf der abgewandten Seite des Eingangs ausreichend sein, ohne dass eine zusätzliche Abschirmung an dieser Stelle hinzugefügt wird. Bei eingeschränktem Platz werden üblicherweise hochdichter Beton hinter der Tür und Blei in der

Eingangswand hinzugefügt. Auch eine Auskleidung aus boriertem Polyethylen in dem hochdichten Beton kann geeignet sein.

Die Berechnung der Abschirmung auf der abgewandten Seite des Eingangs verwendet die sekundäre Standard-Berechnungsmethodologie wie in 9.3 beschrieben. Die schräge Dicke durch die Wand an der Ecke (d_W) (m) ist durch Gleichung (27) gegeben.

$$d_W = \frac{d_o}{\cos(\theta)} - \frac{d_g}{\sin(\theta)} \quad (27)$$

Dabei ist

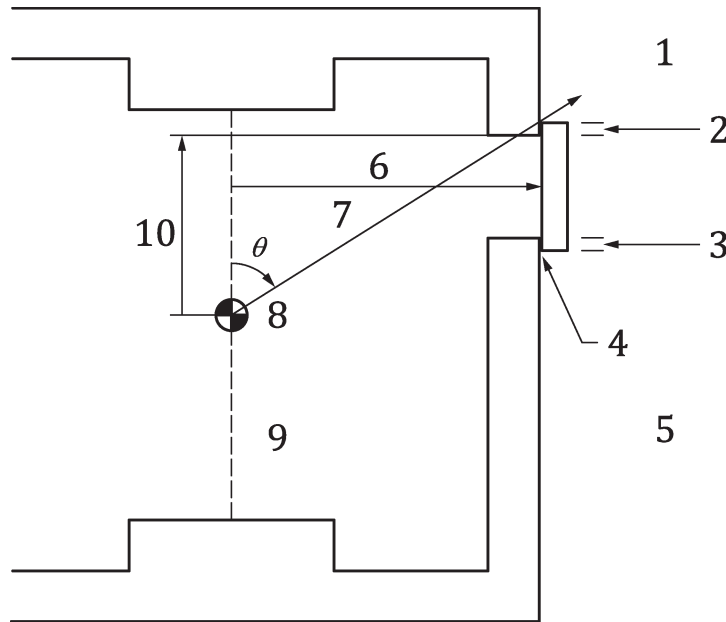
d_o die Türüberlappung über den Eingang hinaus in Metern;

d_g der Abstand zwischen der Betonwand und der Tür in Metern;

$$\theta = \text{atan} \frac{d_d}{d_f + d_o}$$

dabei ist d_f der Abstand zwischen dem Isozentrum und der abgewandten Seite des Eingangs.

Die schräge Dicke durch den Beton (d_C) ist dann gegeben durch d_W abzüglich der schrägen Dicke durch das der Wand hinzugefügte Blei $d_L/\cos(\theta)$, dabei ist d_L die Bleidicke in Metern: $d_C = d_W - d_L/\cos(\theta)$.



Legende

- 1 geschützter Punkt (0,3 m hinter der Türummantelung)
- 2 Türüberlappung über die abgewandte Seite des Eingangs hinaus (d_o)
- 3 übliche Überlappung von 200 mm
- 4 Abstand zwischen Wand und Tür (d_g)
- 5 üblicher Abstand von 10 mm
- 6 Isozentrum zu Tür (d_d)
- 7 sekundärer Abstand
- 8 Isozentrum
- 9 Rotationsebene des Tragarms
- 10 Abstand zwischen Isozentrum und abgewandter Seite des Eingangs (d_f)

Bild 12 — Schräge Dicke auf der abgewandten Seite einer direkt abgeschirmten Tür